

# 掺气设施射流出射角修正方法

董玉萍<sup>1,2</sup>, 郑林平<sup>3</sup>, 李国栋<sup>1</sup>, 李 丹<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室; 2. 内蒙古机电职业技术学院;  
3. 水电水利规划设计总院; 4. 固原市水利勘测设计院有限公司)

**摘要:**掺气设施射流出射角是精准计算掺气空腔长度的核心水力参数,而射流紊动效应通过改变扩散角间接作用于出射角,其内在物理机理十分复杂。为准确处理水流紊动效应对扩散角的影响,基于二元自由紊动射流理论量化了射流水舌下缘紊动扩散角,提出了掺气设施射流出射角修正公式。通过室内精密变坡水槽试验和工程实例,共比较了 193 种工况下 6 种出射角计算方法得到的原型空腔长度,并与原型实测空腔长度进行了对比。模型试验和工程实例验证结果表明,本文提出的掺气设施射流出射角修正方法合理可靠。

**关键词:**出射角;射流;紊动扩散效应;扩散角;空腔长度;掺气设施

**Correction method of take-off angle of jet from aeration facility**//Dong Yuping<sup>1,2</sup>, Zheng Linping<sup>3</sup>, Li Guodong<sup>1</sup>, Li Dan<sup>4</sup>(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology; 2. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics; 3. China Renewable Energy Engineering Institute; 4. Guyuan Water Resources Survey and Design Institute)

**Abstract:** The take-off angle of the jet from aeration facilities is a critical hydraulic parameter for accurately calculating the aerated cavity length. The turbulent characteristics of the jet indirectly influence the take-off angle through modifying the diffusion angle, and the underlying physical mechanism is considerably complex. To rigorously account for the effect of flow turbulence on the diffusion angle, the turbulent diffusion angle at the lower jet nappe was quantified based on the theory of two-dimensional free turbulent jets, leading to the derivation of a modified formula for the take-off angle of jet from aeration facilities. A total of 193 test conditions were examined through laboratory experiments conducted in a precision tilting flume, together with engineering applications. The prototype cavity lengths predicted by six alternative take-off angle estimation methods were compared with measured prototype data. Both the model experiments and engineering validations confirm that the proposed correction method for the take-off angle of jet from aeration facilities is reasonable and reliable.

**Key words:** take-off angle; jet; turbulent diffusion effect; diffusion angle; cavity length; aeration facility

高水头的泄洪建筑物中,水流流速高,泄洪隧洞进口段的收缩部分、闸门槽后的边墙、隧洞的转弯段、溢流堰顶部、泄槽不平整处以及消力齿坎等处易形成低压区<sup>[1-2]</sup>。当这些地方的压力降低到水的饱和蒸汽压以下时,水中的气核会迅速膨胀形成空泡,这些空泡随着水流流动,如果遇到压力再次升高的情况,就会迅速溃灭<sup>[3-4]</sup>。空泡的溃灭过程会产生极大的冲击力和高温,对泄洪结构的壁面造成严重破坏,即空蚀破坏<sup>[5]</sup>,通常采用掺气减蚀设施解决这个问题,防止过流面发生空蚀破坏<sup>[6-7]</sup>。掺气减蚀设施主要由形成空腔的坎(槽)和供气系统组成,其掺气空腔长度是计算掺气量和下游掺气有效保护长度

的一个重要参数,是设计掺气设施的核心指标<sup>[8-9]</sup>。目前掺气空腔长度的计算方法有修正抛射体公式<sup>[10-12]</sup>、因次分析法<sup>[13-14]</sup>、基于势流理论的数值算法<sup>[15]</sup>和射流微元体受力平衡法<sup>[16]</sup>等,其中修正抛射体公式形式简单,运算方便,应用较为广泛。

掺气坎后射流下缘出射角受挑坎高度、水深、紊动扩散效应等要素的影响,其值不等于挑坎挑角,因此采用修正抛射体公式计算掺气空腔长度时需要射流出射角进行修正。针对出射角修正问题,国内外学者已开展大量试验与理论研究。例如:潘水波等<sup>[10-11]</sup>在考虑水深影响的基础上给出了出射角修正公式;Chanson<sup>[17]</sup>在研究空腔阻塞机理时采用的

出射角为挑坎挑角;Steiner 等<sup>[18]</sup>研究射流轨迹时优化了出射角计算方法;Wu 等<sup>[12]</sup>引入权重系数同时考虑水深和紊动扩散效应的影响,给出了出射角计算方法;Pfister<sup>[19]</sup>通过测量射流水舌下缘两个初始轨迹点,给出了有效出射角的计算方法;张法星等<sup>[20]</sup>考虑来流水深和紊动扩散的影响修正了出射角。

目前,射流紊动扩散效应对出射角影响的研究尚未形成完整的理论系统。由于射流紊动效应并不会直接改变抛射方向,而是通过改变扩散角间接影响整体出射角,其内在物理机制复杂,较难处理,本文基于二元自由紊动射流理论给出了射流下缘紊动扩散角的计算方法,提出了射流出射角修正公式,并通过模型试验和工程应用案例进一步确认本文提出的出射角修正方法的合理性和可靠性。

### 1 出射角修正公式

图 1 为掺气坎过流示意图,在掺气挑坎末端建立  $xOy$  直角坐标系, $h_0$  为坎前平均水深, $u_0$  为坎前平均流速, $\gamma$  为挑坎挑角, $\Delta$  为总坎高, $\theta_L$  为射流水舌下缘出射角, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为上游和下游底坡, $A$  为跌坎底端点, $G$  为射流冲击点。坎后射流水舌运动可看作自由抛射体运动,因空腔内负压较小,可忽略。取挑坎顶端端点  $O$  为坐标原点,根据抛射体公式,空腔长度  $L_C$  的计算公式为:

$$L_C = 0.5Fr^2h_0\sin2(\theta_L + \alpha_2) \cdot \left[ \frac{1}{\cos\theta_L} + \sqrt{1 + \frac{2\Delta}{Fr^2h_0\sin^2(\theta_L + \alpha_2)}} \right] \quad (1)$$

其中  $\Delta = t_r + t_s$   
式中: $Fr$  为坎前弗劳德数; $t_r$  为挑坎坎高, $t_s$  为跌坎坎高。

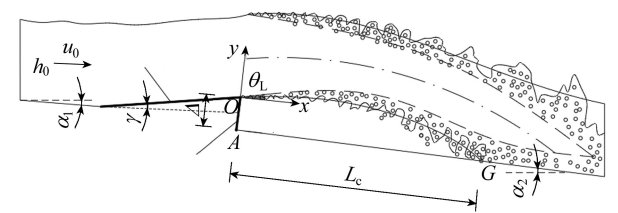


图 1 掺气坎过流示意图

出射角是影响式(1)计算精度的关键参数,结合目前的研究成果,其主要受坎前水深和水舌下缘紊动扩散的影响。实际上,掺气坎后射流水舌下缘已为充分发展的紊流,可看作二元自由紊动射流。水舌下缘紊动扩散角可由二元自由紊动射流理论给出。

#### 1.1 射流水舌下缘紊动扩散角

图 1 中的过坎水流以速度  $u_0$  脱离挑坎,在运动

过程中由于黏滞性作用上下缘呈现一种犬牙交错的不规则状态,其不断卷吸周围的空气进行动量交换,使射流核心区域沿流动方向( $x$  方向)逐渐变窄,竖向( $y$  方向)高度不断增加,直至消失,消失点之后的部分称为射流的充分发展区。图 2 为坎后自由射流水舌紊动扩散示意图,为简化分析,假定坎前水深  $h_0$  趋向于 0,假定射流上下缘紊动程度相同,将坐标原点取在挑坎处的射流中心,建立如图所示的  $xOy$  直角坐标系。由于过坎射流的流量为一有限值,过坎射流速度应趋向于无限大,水流一脱离挑坎就形成充分发展区。在射流中沿  $y$  方向的速度梯度  $\partial u/\partial y$  很大,直至射流上下缘处降为 0,而  $x$  方向流速变化较慢,射流高度与长度相比为小量,这一流动特征与边界层相似,可采用边界层微分方程来处理。

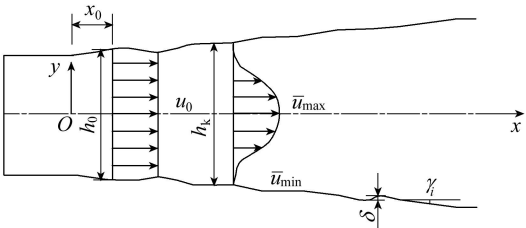


图 2 坎后自由射流水舌紊动扩散示意图

在图 2 中, $\gamma_i$  为射流上下缘紊动扩散角,坎后射流运动到  $x=x_0$  位置时坎前水深为  $h_0$ ,中心线的速度为  $u_0$ 。以  $x=x_0$  中心线为参考点,射流水舌沿流动方向紊动程度逐渐增大,其运动到某点处中心线上速度为  $\bar{u}_{\max}$ ,上下缘处速度为  $\bar{u}_{\min}$ ,射流高度为  $h_k$ ,紊动扩散角可表示为  $\gamma_i = \arctan(0.5h_k/x)$ 。

根据射流各横截面速度剖面的自保存特性,射流中心线速度  $\bar{u}_{\max}$  可表示为:

$$\bar{u}_{\max} \sim \sqrt{M/\rho x} \sim x \quad (2)$$

式中: $M$  为单位时间通过任一单位宽度横截面的总动量; $\rho$  为流体密度。

射流半高度为

$$0.5h_k \sim x \quad (3)$$

忽略紊动射流中的黏性切应力,由二维连续方程和 N-S 方程可得:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0$$

式中: $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  分别为  $x$  和  $y$  方向的平均速度; $p$  为流体动水压强; $\bar{p}$  为流体动水平均压强; $\tau_t$  为自由紊动射流切应力。

式(5)的第一边界条件为: $y=0, \bar{u} = u_{\max}, \bar{v} = 0,$

$\partial \bar{u} / \partial y = 0$ , 其中  $u_{\max}$  为运动到某点处的最大速度,  $v$  为  $y$  方向速度; 第二边界条件为  $y \rightarrow \infty, \bar{u} = 0, \partial \bar{u} / \partial y = 0$ 。

湍流边界层中混合长度  $l$  与射流高度  $h_k$  成正比, 即  $l = 0.5 \sqrt{k_1} h_k$ , 其中  $k_1$  为常数, 由试验确定。如取速度梯度近似等于断面上最大速度与最小速度之差除以射流高度  $h_k$ , 即:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \approx \frac{1}{0.5 h_k} (\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}) \quad (6)$$

则涡黏度可表示为:

$$\nu_t = 0.5 k_1 h_k (\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}) = 0.5 k_1 h_k \bar{u}_{\max} \quad (7)$$

其中  $\bar{u}_{\max} = \bar{u}_0 (x/x_0)^{-1/2}$   $h_k = h_0 x/x_0$

由式(7)可得, 初始状态的涡黏度  $\nu_{t0} = 0.5 k_1 h_0 \bar{u}_0$ , 则有:

$$\frac{\nu_t}{\nu_{t0}} = \frac{h_k \bar{u}_{\max}}{h_0 \bar{u}_0} = \frac{x}{x_0} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{-1/2} = \left( \frac{x}{x_0} \right)^{1/2} \quad (8)$$

令

$$\bar{u} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \bar{u}_{\max} F'(\eta) = \bar{u}_0 \left( \frac{x}{x_0} \right)^{-1/2} F'(\eta) \quad (9)$$

其中

$$\eta = \sigma y/x$$

式中:  $\psi$  为流函数;  $\eta$  为相似变量;  $\sigma$  为待定常数;  $F(\eta)$  为待定函数, 下文简写为  $F$ 。

由式(9)可求得流函数  $\psi$  和速度分量  $\bar{v}$  分别为:

$$\psi = \sigma^{-1} \bar{u}_0 x_0^{1/2} x^{1/2} F \quad (10)$$

$$\bar{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \sigma^{-1} \bar{u}_0 \left( \frac{x_0}{x} \right)^{1/2} \left( \eta F' - \frac{1}{2} F \right) \quad (11)$$

将式(8)~(11)代入式(5), 得:

$$2F'^2 + 2FF'' + F''' = 0 \quad (12)$$

令  $\sigma = (u_0 x_0 / \nu_{t0})^{1/2} / 2$ , 根据式(5)的边界条件可以获得式(12)的第一和第二边界条件分别为:  $\eta = 0, F = 0, F' = 1, F'' = 0$ ;  $\eta \rightarrow \infty, F' = 0, F'' = 0$ 。

由边界条件  $F' = 0$ , 式(12)转化为:

$$2FF'' + F''' = 0 \quad (13)$$

上式进一步为:

$$2FF' + F'' = 0 \quad (14)$$

对上式积分可得:

$$F^2 + F' = C_1 \quad (15)$$

式中:  $C_1$  为积分常数。代入定解条件  $\eta = 0$  和  $F = 0$ , 得  $F'(0) = C_1$ , 通常令  $C_1 = 1$ 。

将  $C_1 = 1$  代入式(15)得:

$$F^2 + F' = 1 \quad (16)$$

将式(16)简化为:

$$\frac{dF}{1 - F^2} = d\eta \quad (17)$$

对上式积分可得:

$$\operatorname{arctanh} F = \eta + C_2 \quad (18)$$

利用边界条件  $\eta = 0$  和  $F = 0$  得到  $C_2 = 0$ , 则式(18)可写为:

$$F = \tanh \eta \quad (19)$$

$$\bar{u} / \bar{u}_{\max} = \operatorname{sech}^2 \eta \quad (20)$$

相似变量  $\eta = \sigma y/x$  转化为:

$$\eta = 0.5 \sigma h_k / x = \sigma \operatorname{arctan} \gamma_i \quad (21)$$

由式(21)可知, 要获得紊动扩散角  $\gamma_i$ , 需要确定  $\bar{u} / \bar{u}_{\max}$  和  $\sigma$ 。Gortler 通过实验确定  $\sigma = 7.67^{[18]}$ 。

事实上, 掺气坎射流水舌上下缘分别为自由射流和固壁射流, 上下边界不同, 上下缘速度分布不一致, 导致出口处的射流上下缘扩散角不同。

时启隧<sup>[21]</sup>对明渠水流掺气进行了系统研究, 明渠上部掺气水流和近底水流的断面平均流速和最大流速的关系可用边界层内流速分布的指数律表示, 其表达式为:

$$\bar{u} / \bar{u}_{\max} = (y/h_0)^{1/m} \quad (22)$$

取  $m = 7$ , 明渠上部掺气水流  $\bar{u} / \bar{u}_{\max} = 0.875$ , 明渠近底水流  $\bar{u} / \bar{u}_{\max} = 0.817$ 。

因此, 令  $\bar{u} / \bar{u}_{\max}$  分别为 0.875、0.817, 将其代入式(20)~(21), 计算相应的紊动扩散角  $\gamma_i$  分别为 2.76° 和 3.41°。因此下缘紊动扩散角  $\gamma_L$  取 3.41°。

## 1.2 射流水舌下缘出射角修正

坎上水深对出射角的影响采用潘水波等<sup>[10]</sup>、Rutschmann 等<sup>[11]</sup>给出的公式, 并考虑射流水舌下缘紊动扩散的影响, 水舌下缘出射角修正为:

$$\theta_L = \gamma \sqrt{\tanh(t_r/h_0 \gamma)} - \gamma_L \quad (23)$$

式中:  $\gamma_L = 3.41^\circ$ 。

将式(23)代入式(1)就能计算掺气空腔长度。

## 2 模型试验

### 2.1 物理模型

试验采用精密变坡水槽, 水槽长 7 m, 宽 0.15 m, 高 0.25 m, 水槽坡度  $\alpha$  取 6°、5°、3°, 最大供水量为 0.20 m³/s; 在水槽末端布置掺气挑坎, 取固定掺气挑坎挑角  $\gamma$  为 5.71°, 掺气挑坎高度  $t_r$  取 0.01、0.02、0.03、0.04 m, 分别对应 M1 型、M2 型、M3 型、M4 型。坎前水深  $h_0 = 0.03 \sim 0.19$  m, 坎前流速  $u_0 = 2.80 \sim 6.00$  m/s, 水流弗劳德数  $Fr = 2.50 \sim 6.51$ , 雷诺数  $Re = 1.96 \times 10^5 \sim 7.50 \times 10^5$ , 韦伯数  $We = 102 \sim 252$ , 共计 180 种工况。试验工况见表 1。

试验坎前水深采用钢板尺量测, 精度为 1 mm, 下游流量采用矩形薄壁量水堰进行量测。试验整体模型见图 3。



表 1 试验工况

| $\alpha/(^{\circ})$ | 工况数 | $Fr$ | $h_0/m$             | 体型    |
|---------------------|-----|------|---------------------|-------|
| 6                   | 8   | 3.5  | 0.139, 0.096        | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.0  | 0.154, 0.164, 0.074 | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.5  | 0.112, 0.096, 0.054 | M1~M4 |
|                     | 12  | 5.0  | 0.120, 0.115, 0.077 | M1~M4 |
|                     | 12  | 6.0  | 0.083, 0.039, 0.047 | M1~M4 |
|                     | 4   | 6.5  | 0.054               | M1~M4 |
| 5                   | 4   | 3.0  | 0.107               | M1~M4 |
|                     | 12  | 3.5  | 0.143, 0.160, 0.081 | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.0  | 0.169, 0.173, 0.105 | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.5  | 0.120, 0.118, 0.058 | M1~M4 |
|                     | 12  | 5.0  | 0.123, 0.080, 0.039 | M1~M4 |
|                     | 4   | 5.5  | 0.086               | M1~M4 |
| 3                   | 4   | 6.5  | 0.054               | M1~M4 |
|                     | 4   | 2.5  | 0.123               | M1~M4 |
|                     | 8   | 3.0  | 0.157, 0.093        | M1~M4 |
|                     | 12  | 3.5  | 0.170, 0.115, 0.068 | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.0  | 0.178, 0.124, 0.045 | M1~M4 |
|                     | 12  | 4.5  | 0.132, 0.129, 0.087 | M1~M4 |
|                     | 8   | 5.0  | 0.125, 0.057        | M1~M4 |
|                     | 4   | 6.0  | 0.090               | M1~M4 |

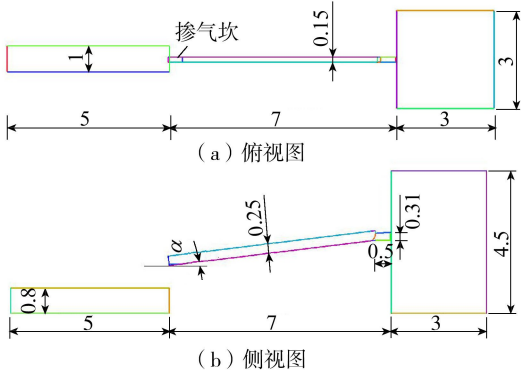


图 3 试验整体模型布置(单位:m)

2.2 水舌下缘轨迹测量系统

传统掺气设施由于射流水舌在冲击底板时发生剧烈旋滚,难以捕捉下缘轨迹,影响了掺气空腔长度的测量精度。本文在水槽末端设置掺气坎,使射流水舌在空中运动,这样所测得的水舌下缘轨迹清晰,便于准确测量掺气空腔长度,可为解决缓坡泄槽掺气设施空腔的回水问题、研发新的曲线型掺气设施提供理论支撑。

试验采用图像处理技术来测量空中射流水舌运动轨迹。相机架设在垂直于空中水舌一侧,固定相机与水舌之间的距离,在相机另一侧布设白板网格,白板尺寸为 2.50 m×1.50 m,白板上网格尺寸为 0.05 m×0.10 m,并在白板边缘处贴有精度为 1 mm 的钢板尺,相机视频分辨率为 2400×1080,视频帧率为 25 帧/s,相机覆盖范围为 2.50 m<sup>2</sup>,可以拍摄到大部分水舌运动轨迹。

通过张氏标定法获得相机内参和外参,使空中水舌运动轨迹点的位置与其在图像中轨迹点位置相

对应,再利用 OpenCV 平台和 Python 语言提取视频帧、去背景、二值化、均值化、去噪点、边缘检测(Sobel 微分算子)、视频帧输出等一系列操作,获得水舌运动轨迹图像,如图 4 所示,每个工况输出 3 张,从该图读取轨迹点坐标,每个轨迹点平行读取 3 次,取平均值。射流水舌下缘轨迹获得后,就能计算掺气空腔长度。

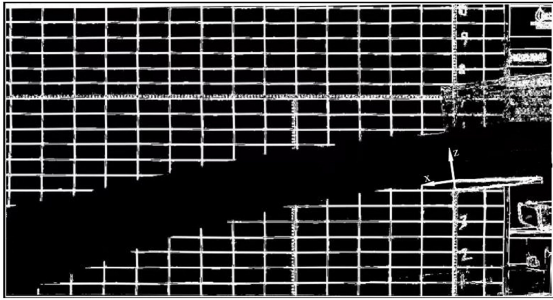


图 4 水舌运动轨迹图像

3 验证结果

将文献[10-13,18,20]中的出射角公式分别代入式(1)计算空腔长度,并与本文考虑紊动扩散影响修正的出射角公式(式(23))代入式(1)计算的空腔长度进行对比,如图 5 所示。再在文献[22]中选取国内 4 个实际工程共 13 种工况,各工况下掺气设施体型参数和水力参数变量见表 2,分别采用上述 6 种方法计算原型空腔长度,并与原型实测空腔长度进行对比(图 6)。由图 5 和图 6 可知,采用文献[12,20]和本文修正出射角公式与刚体抛射公式相结合,计算的空腔长度与实测空腔长度吻合较好,主要原因是这 3 种方法都考虑了坎后射流水舌紊动扩散的影响,但采用本文提出的出射角修正方法计算掺气空腔长度误差在±25%以内,而文献[12,20]的误差在±30%以内,误差高了 5 个百分点,说明本文提出的掺气设施出射角修正方法具有合理性。

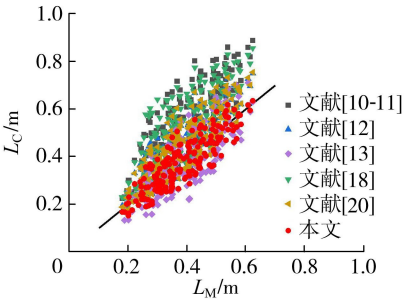


图 5 模型实测空腔长度  $L_M$  与计算空腔长度  $L_C$  的对比

4 结 语

现有射流出射角计算方法多基于水深、挑坎挑角、多因子加权等经验方式构建,难以系统揭示射流

表 2 原型掺气坎体型结构参数和水力参数

| 工程名称             | 掺气设施类型   | $\Delta/\text{m}$ | $\gamma/(\text{^\circ})$ | $Fr$  | $u_0/(\text{m/s})$ |
|------------------|----------|-------------------|--------------------------|-------|--------------------|
| Foz do Areia 1 号 | 挑跌掺气坎    | 0.20              | 7.10                     | 8.72  | 24.02              |
| Foz do Areia 2 号 | 挑跌掺气坎    | 0.15              | 7.10                     | 9.64  | 26.32              |
| Foz do Areia 3 号 | 挑跌掺气坎    | 0.10              | 7.10                     | 10.80 | 28.09              |
| 鲁布革 1 号          | 坎槽组合式掺气坎 | 0.60              | 10.76                    | 3.94  | 28.83              |
| 鲁布革 2 号          | 掺气挑坎     | 0.60              | 7.13                     | 3.96  | 31.73              |
| 乌江渡 1 号          | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 3.54  | 27.22              |
|                  | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 3.92  | 26.26              |
|                  | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 4.15  | 24.12              |
|                  | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 4.15  | 24.12              |
| 乌江渡 2 号          | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 3.92  | 26.26              |
| 冯家山 1 号          | 坎槽组合式掺气坎 | 0.85              | 11.31                    | 3.54  | 27.22              |
|                  | 坎槽组合式掺气坎 | 0.60              | 3.81                     | 6.15  | 32.72              |
| 冯家山 2 号          | 掺气挑坎     | 0.30              | 7.13                     | 7.14  | 36.11              |

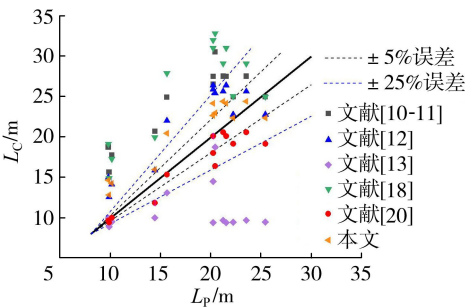


图 6 原型实测空腔长度  $L_p$  与计算空腔长度的对比

紊动扩散效应对出射角与扩散角内在联系的影响。本文基于二元自由紊动射流理论,给出了射流下缘紊动扩散角的计算方法,提出了射流下缘出射角修正公式。模型试验和工程实例验证结果表明,采用本文提出的掺气坎出射角修正方法计算所得的空腔长度的精度比前人提高了 5%。本文研究成果补充和完善了射流紊动效应对扩散角影响的物理机制,为精准设计局部陡坡掺气坎体型奠定了坚实的基础,具有重要的工程意义。

参考文献:

[ 1 ] Xu Weilin, Zhang Yalei, Luo Jing, et al. The impact of particles on the collapse characteristics of cavitation bubbles[J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 15-24.

[ 2 ] 孙振兴,王芳芳,孙晨光,等. 缓坡泄洪放空洞掺气坎水力特性试验分析[J]. 水力发电学报, 2023, 43(2): 57-66. (Sun Zhenxing, Wang Fangfang, Sun Chenguang, et al. Experimental analysis of hydraulic characteristics of aerators in spillway tunnels with mild slope[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 43 ( 2 ): 57-66. ( in Chinese ))

[ 3 ] 李贵吉,张建民. 前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 46-52. ( Li Guiji, Zhang Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and

bottom drop aerator [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 ( 4 ): 46-52. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 马斌,王宇航,缙文娟,等. 高重力坝挑坎体型及水力特性对比[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 71-77. ( Ma Bin, Wang Yuhang, Gou Wenjuan, et al. Comparison of flip bucket shapes and hydraulic characteristics of a high gravity dam[ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 71-77. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 张恒,胡海豹. 基于格子 Boltzmann 方法的空泡溃灭过程模拟[J]. 华中科技大学学报( 自然科学版 ), 2024, 52(4): 42-48. ( Zhang Heng, Hu Haibao. Simulation of cavitation collapse process based on lattice Boltzmann method[ J ]. Journal of Huazhong University of Science and Technology ( Nature Science Edition ), 2024, 52(4): 42-48. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 张建民. 高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 1-18. ( Zhang Jianmin. Hydraulics of high-speed flows: recent achievements and future outlook [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 40(3): 1-18. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 高元,刘博,赵蒙,等. 空化水射流研究方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 18-25. ( Gao Yuan, Liu Bo, Zhao Meng, et al. Review of research methods on cavitation water jet [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 18-25. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 李建中,宁利中. 高速水力学[ M ]. 西安:西北工业大学出版社,1994.

[ 9 ] 李书芳,吴建华,马飞. 基于出射流速的反弧鼻坎挑距计算[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 58-62. ( Li Shufang, Wu Jianhua, Ma Fei. Calculation of jet trajectory distance of flip bucket based on takeoff velocity [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 58-62. ( in Chinese ) )

( 下转第 36 页 )

- Computers and Geotechnics,2020,121:103475.
- [21] 李伟一,钱建固,尹振宇,等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟[J]. 岩土力学,2021,42(11):3191-3201. ( Li Weiyi, Qian Jiangu, Yin Zhenyu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(11):3191-3201. (in Chinese) )
- [22] Liu Yajing, Wang Lizhong, Hong Yi, et al. A coupled CFD-DEM investigation of suffusion of gap graded soil: coupling effect of confining pressure and fines content [ J ]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020,44(18):2473-2500.
- [23] Chen Ding, Huang Wenxiong, Huang Dan. A study of overtopping breach process with soil-water erosion using improved smoothed particle hydrodynamics [ J ]. Acta Geotechnica, 2024,19(2):939-951.
- [24] Kézdi A. Soil physics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1979.
- [25] Wang Tuo, Zhang Fengshou, Wang Pei. Experimental and numerical study of seepage-induced suffusion under  $K_0$  stress state[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2023,24(4):319-331.
- [26] 丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析[J]. 水土保持学报, 2024,38(4):143-152. ( Ding Ziyue, Xu Zengguang, Cao Cheng, et al. Influence analysis of discrete element model parameters in seepage erosion simulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):143-152. (in Chinese) )
- [27] 许增光, 武子豪, 曹成, 等. 颗粒形态对间断级配砂砾土内部侵蚀影响研究[J]. 水力发电学报, 2025,44(7):97-108. ( Xu Zengguang, Wu Zihao, Cao Cheng, et al. Study on impact of particle morphology on internal erosion in gap-graded sand and gravel soils[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025,44(7):97-108. (in Chinese) )
- [28] Gelet R, Marot D. Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: model and sensibility analysis [ J ]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022,31:100313.
- [29] Song Yixiang, Chen Xu, Li Zhao. Investigation on the failure mechanism of the internal erosion in inverse grading sand based on DDA and Darcy's law [ J ]. Computers and Geotechnics, 2024,173:106516.
- [30] Hu Zheng, Zhang Yida, Yang Zhongxuan. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study [ J ]. Acta Geotechnica, 2019,14(3):795-814.
- [31] 丁子玥. 基于离散元模拟的间断级配土细观渗流侵蚀破坏过程分析及机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

( 收稿日期: 2025 - 04 - 30 编辑: 熊水斌)

( 上接第 20 页)

- [10] 潘水波, 邵瑛瑛, 时启燧, 等. 通气挑坎射流的挟气能力 [J]. 水利学报, 1980(5):13-22. ( Pan Shuibao, Shao Yingying, Shi Qisui, et al. The self-aeration capacity of the water jet over the aeration ramp[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(5):13-22. (in Chinese) )
- [11] Rutschmann P, Hager W H. Air entrainment by spillway aerators[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990,116(6):765-782.
- [12] Wu Jianhua, Ruan Shiping. Cavity length below chute aerators [ J ]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008,51(2):170-178.
- [13] Pfister M, Hager W H. Chute Aerators. I: air transport characteristics [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,136(6):352-359.
- [14] 时启燧, 潘水波, 邵瑛瑛, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J]. 水利学报, 1983(3):1-13. ( Shi Qisui, Pan Shuibao, Shao Yingying, et al. Experimental investigation of flow aeration to prevent cavitation erosion by a deflector[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(3):1-13. (in Chinese) )
- [15] 杨永森, 杨永全. 掺气减蚀设施后二维空腔流动计算 [J]. 水利学报, 2000(6):54-60. ( Yang Yongsan, Yang Yongquan. Numerical calculation for two-dimensional cavity flow downstream of an aerator [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6):54-60. (in Chinese) )
- [16] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 掺气坎(槽)射流空腔长度的计算 [J]. 水利水电技术, 2004,35(10):7-9. ( Xu Yimin, Wang Wei, Xu Weilin, et al. Calculation of the cavity length of jet flow from chute aerators [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004,35(10):7-9. (in Chinese) )
- [17] Chanson M H. Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 1995,33(3):361-372.
- [18] Steiner R, Heller V, Hager W H, et al. Deflector ski jump hydraulics [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(5):562-571.
- [19] Pfister M. Jet impact angel on chute downstream of aerator [ C ]//4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Portugal: IAHR, 2012,1-8.
- [20] 张法星, 徐建强, 徐建军. 掺气坎射流出射角的修正方法 [J]. 人民长江, 2010,41(2):87-90. ( Zhang Faxing, Xu Jianqiang, Xu Jianjun. Correction method for emergence angle of jet flow over aerator [ J ]. Yangtze River, 2010,41(2):87-90. (in Chinese) )
- [21] 时启燧. 高速水气两相流 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 孙健. 高拱坝坝身泄洪和消能防冲 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.

( 收稿日期: 2025 - 02 - 18 编辑: 俞云利)