

水平旋转内消能泄水道空腔环流的能动量特性

牛争鸣, 张鸣远

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 研究了水平旋转内消能泄水道空腔环流特有的能动量特性. 试验观测与分析结果表明: 在水平洞的起始段, 空腔环流的环向动能沿程急剧减小, 进而转化为各占一定比例的环向与轴向动能, 并伴随着大量的能量损失; 环向的能动量在起始段较大, 但在中间段与轴向的能动量比值已接近 1, 沿程的变化也较小; 环向的动能与压能沿程变化相反并互相对应; 环向的能量沿程变化规律决定了总能量的沿程变化规律; 能量损失与常规的明流或有压泄水道相比大大增加, 能量损失机理更为复杂.

关键词: 内消能泄水道; 水平旋转; 空腔环流; 能动量特性

中图分类号: TV651.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)07-0741-05

Characteristics of Kinetic Energy and Momentum of Horizontal Rotary Cavity Flow in Internal Dissipating Tunnel

Niu Zhengming, Zhang Mingyuan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The special characteristics of kinetic energy and momentum of horizontal rotary cavity flow in internal dissipating tunnel with an inlet shaft are analyzed. The results indicate that the circulating flow kinetic energy reduces tempestuously with larger energy loss in the initial tunnel and varies gradually in a proportion to the axial flow kinetic energy along the tunnel, the circulating flow kinetic energy and momentum in the initial tunnel is larger but the ratio to the axial flow kinetic energy and momentum approaches 1:1 in the middle tunnel with less change, and the change of circulating flow kinetic energy and momentum is contrary to the change of the axial flow kinetic energy and momentum. The transformation law of circulating flow energy determines the change of total energy along the tunnel, the energy loss greatly increases compared with general free or pressured discharge tunnel, and the energy loss mechanism behaves more complicatedly.

Key words: internal energy dissipation tunnel; horizontal rotary; cavity circulating flow; characteristic of kinetic energy and momentum

在高坝建设中,因其多建在高山峡谷中,故具有水头高、泄量大、消能空间狭小和泄水建筑物难以布置等特点,往往需要大尺度导流洞.另外,常规的挑流消能方案常引起一系列高速水流问题,如空蚀破坏、雾化和岸坡冲刷破坏.为了解决这些问题和探讨将大尺度导流洞改建为永久式泄洪洞,以缩短工期和降低工程造价,从 20 世纪六七十年代起国内外就

开始了旋流式内消能工的研究工作,但这些工作大都针对具体工程与竖井旋流式内消能工.在总体上,因我国高坝建设的需要,旋流式内消能工在工程的设计研究方面,我国已处领先水平.关于水平旋流式内消能工的研究,从公开发表的论文所见,国外只有前苏联^[1],国内也为数不多^[2-8].关于空腔环流的能动量特性的研究,尚未见有公开报道.本文通过试验

收稿日期: 2003-09-29. 作者简介: 牛争鸣(1957~),男,博士生,西安理工大学水利水电学院教授;张鸣远(联系人),男,教授,博士生导师.

观测,在流速分布假定下,分析了水平旋转空腔环流特有的能动力特性。

1 水平旋转内消能泄水道空腔环流流速分布的假定^[5]

空腔环流的环向水流流速分布按自由涡分布假定

$$V r = C \quad (1)$$

C 在泄流量 Q 不变时仅为轴向位置 z/D 的函数。

空腔环流的轴向水流流速分布按多项式分布假定,据其流动特征、模型试验的观测结果及空腔环流的轴向水流的边界条件确定的轴向水流流速分布为

$$V_z/V_{z0} = 1 - (1 - r/r_0)^2 / (1 - R/r_0)^2 \quad (2)$$

其中 V_{z0} 可由同一断面对泄流量的微元 $dQ = 2 r V_z dr$ 进行积分后获得

$$V_{z0} = Q / (2 F_1(r_0)) \quad (3)$$

将式(1)沿断面积分后得环向断面平均流速

$$V = 2C / (R + r_0) \quad (4)$$

由泄流量与过水断面面积可得轴向断面平均流速

$$V_z = Q / [(R^2 - r_0^2)] \quad (5)$$

2 空腔环流的能动力量的定义

2.1.1 空腔环流的能量

(1) 按动能的定义,空腔环流轴向水流的断面总动能为

$$E_z = \int_{r_0}^R 2 r V_z^3 dr / 2$$

代入式(2)积分可得

$$E_z = 2 V_{z0}^3 F_2(r_0) \quad (6)$$

空腔环流轴向水流的单位质量流体的动能为

$$E_z = E_z / Q \quad (7)$$

(2) 按动能的定义,空腔环流环向水流的断面总动能为

$$E = \int_{r_0}^R 2 r V_z dr V^2 / 2$$

代入式(1)、(2)积分可得

$$E = C^2 V_{z0} F_3(r_0) \quad (8)$$

空腔环流环向水流的单位质量流体的动能为

$$E = E / Q \quad (9)$$

(3) 空腔环流断面的总压能为

$$E_p = \int_{r_0}^R 2 r V_z dr p \quad (10)$$

径向压力分布可由径向水流微元体的动量平衡微分方程,将式(1)代入积分后得到

$$p = - C^2 r^{-2} / 2 + C_1$$

C_1 为积分常数,可由边界条件 $r = R, p = p_w$ 确定,最后可得

$$p - p_w = C^2 (1/R^2 - 1/r^2) / 2 \quad (11)$$

将式(12)代入式(11)积分可得

$$E_p = 2 V_{z0} p_w F_1(r_0) + 2 V_{z0} (C^2/2) F_4(r_0) \quad (12)$$

空腔环流的单位质量流体的压能为

$$E_p = E_p / Q \quad (13)$$

2.1.2 空腔环流的动量

(1) 空腔环流轴向水流的断面的总动量为

$$T_z = \int_{r_0}^R 2 r V_z^2 dr$$

代入式(1)、(2)积分可得

$$T_z = 2 V_{z0}^2 F_5(r_0) \quad (14)$$

空腔环流的轴向水流的单位质量流体的动量为

$$T_z = T_z / Q \quad (15)$$

(2) 空腔环流环向水流的断面的总动量为

$$T = \int_{r_0}^R 2 r V_z V dr$$

代入式(1)、(2)积分可得

$$T = 2 C V_{z0} F_6(r_0) \quad (16)$$

空腔环流环向水流的单位质量流体的动量为

$$T = T / Q \quad (17)$$

以上各式中 Q 、 r_0 、 p_w 均可由试验确定。式(6)~式(17)的意义为通过理论分析,确定了空腔环流的各种能动力特性与压力 p_w 、泄流量 Q 和空腔环流半径 r_0 之间的函数关系,并可以由其实测资料确定各种能动力特性的变化。在这些表达式中依次出现的 $F_1(r_0) \sim F_6(r_0)$ 均为与速度分布有关的积分函数,且仅与 r_0 有关。

2.1.3 空腔环流的能量损失及其机理

空腔环流的断面总能量损失,可由起始断面总能量与 z 断面总能量之差决定

$$E_f = (E_z + E + E_p)_0 - (E_z + E + E_p)_z \quad (18)$$

前面诸式给出的关系,由于各部分能量可相互转化,所以只能确定各部分能量的构成与沿程变化、总能量损失。水平旋转空腔环流的能量损失,因其存在高速旋转的空腔环流,所以与常规的明流或有压泄洪洞的能量损失的机理与数值有显著的区别,能量损失大大增加,其机理更为复杂并与空腔环流的

旋流特性有密切关系。

3 空腔环流的能动力特性的试验观测结果

3.1.1 试验模型体型及尺寸

本文试验所采用的试验模型及尺寸如图 1 所示。各部分尺寸均按其与其与洞径的比值确定。其中原型洞径 $D = 16 \text{ m}$, 相对洞长 $L/D = 35$, 相对通气孔直径 $D_0/D = 0.10625, 0.1125$, 起旋器收缩断面的面积收缩比 $A_0/A = 0.1448$ 。试验模型按重力相似设计, 几何比尺为 $1:100$ 。模型试验工况为相对上游水位 $H/D = 6 \sim 14$, 相对下游水位 $h/D = 0.15 \sim 4$, 共 25 种水位的组合。壁面压力 p_w 采用测压管量测, 通风量采用风速仪量测, 环流空腔直径 d_0 采用自制探针由水平洞上下左右 4 个方向的量测值平均确定, 泄流量 Q 由 90 的三角堰量测。各种物理量量测的相对误差均在 $3\% \sim 5\%$ 之内。试验在西安理工大学高速水流实验室内完成。

3.1.2 空腔环流的相关物理特性的试验观测结果^[5-7]

图 1 所示典型的竖井进流水平旋转内消能泄水道, 其流态可分为淹没流、吸允流和自由流。在吸允流和自由流流态时, 泄流量 Q 的变化规律符合弧形底坎闸孔出流的基本公式

$$Q = \mu A_0 (2gH)^{1/2}$$

式中: A_0 为起旋器出口收缩断面的面积; H 为上游水深; μ 为流量系数。试验观测结果表明, 在吸允流流态时 $\mu = 0.1344 [(H-h)/h]^{0.124}$, 在自由流流态时 $\mu = 0.15$ 。

环流空腔直径 d_0 的基本变化规律为: 在下游水位较低时随上游水位的变化较小, 数值较大; 在下游

水位较高时随上游水位的减小变化较大, 数值减小并趋向于 0。

任一位置及工况的壁面压力变化规律可表示成

$$p_w = V_z^2 C_{pw} / 2$$

式中: C_{pw} 为壁面离心力压强系数, 由试验资料得到的变化规律为 $C_{pw} = A_1 e^{B_1 Fr}$, $A_1 = 3159z/D + 113155$, $B_1 = -0.10677z/D - 611567$, $Fr = Q / (A_0 (gH)^{1/2})$ 为起旋器出口收缩断面的水流傅汝德数。

3.1.3 空腔环流的能量特性

图 2 为单位质量流体的各种能量沿相对流程 z/D 的变化规律。由图可见, 总能量 E 与环向水流的动能 E 的变化规律相似, 具有明显的分段变化性质, 即起始迅速减小段、平稳与快速减小段、尾部平缓变化段。这表明 E 的变化规律决定着 E 的变化规律。起始迅速减小段约 4 倍的洞径长, 平稳与快速减小段从 $z/D = 4$ 左右开始至 $z/D = 25$ 左右结束。压能与轴向的动能在起始段变化规律相反, 压能迅速减小, 轴向的动能快速增大, 但在起始段后二者沿程的变化均较小。上游水位变低时, 各种能量沿程的变化明显减小。

图 3 为相对于断面总能量的各种能量随 z/D 的变化。由图可见, E 从起始占总能量的 50% 左右, 分段沿程降低至洞末的 35% 左右; 相对压能与相对轴向动能的变化规律相反, 在起始段压能相对减小, 轴向的动能相对增大, 能量分别从起始占总能量的 35%、15% 左右降、升至洞末的 20% 与 40% 左右; 上游水位越高, 相对压能与相对轴向动能曲线的交汇点就越靠前; 相对压能与相对轴向动能相对减小与相对增大相对应。从上面的变化规律可以得出两点重要的结论: 在起始段, 压能迅速减小并转换为

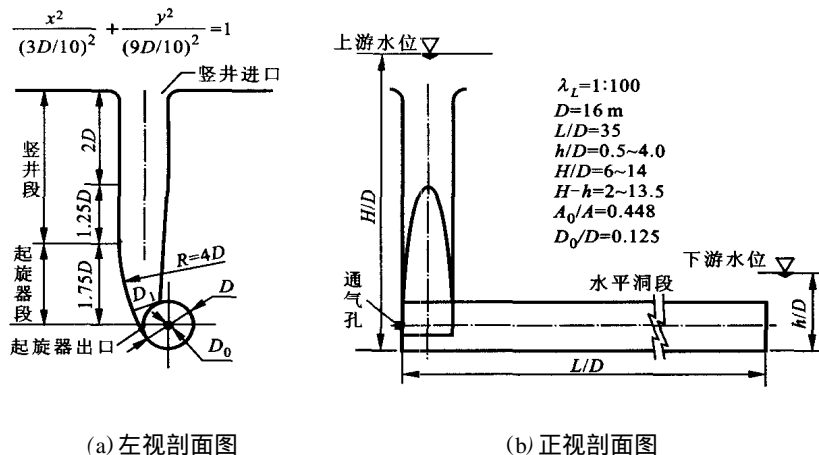


图 1 试验模型的体型与几何尺寸

轴向的动能;环向动能沿程降低,并不断地把能量转化为压能、动能以维持轴向的连续流动.

从相对于断面总能量的各种能量随相对上游水位 H/D 的变化规律可以得出,在起始断面,各种相对能量随 H/D 的变化不大,但在洞中断面,随 H/D 的增大,相对压能减小,相对轴向动能增加,相对环向动能先增后减.这表明能量之间沿洞长的转变规律在上游水位不同时是不同的,上游水位越高,轴向动能沿程的保持性就越好,环向动能衰减的就越快.

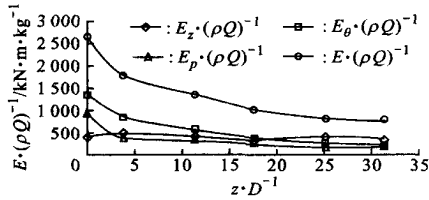


图2 单位质量流体能量沿 z/D 的变化

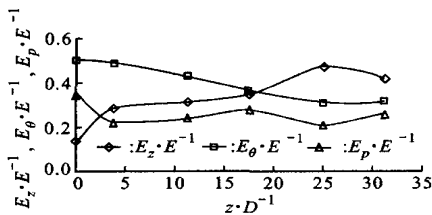


图3 各种能量相对值随 z/D 的变化

314 空腔环流的动量特性

图4所示为空腔环流的轴向与环向水流的单位质量流体具有的动量随 z/D 的变化规律.由图可见,环向水流的单位质量流体具有的动量随 z/D 有较大的变化,具有明显的沿程衰减的特性,亦具有明显的分段变化性质,而轴向水流的动量则具有较好的保持性.

图5为相对于断面总动量的轴向与环向动量随 z/D 的变化规律.由图可见,环向水流的相对动量从起始占总动量的65%左右,分4段沿程降低至洞末的50%左右,相对轴向动量与相对环向动量的变化规律相反,从起始段的35%分4段沿程增加至洞末的50%左右;上游水位越高,相对环向动量与相对轴向动量曲线的交汇点就越靠前.从图中亦可看出轴向与环向动量的比值随 z/D 的变化规律,即相对于环向动量,轴向动量在起始段迅速增大,保持一段距离基本不变,然后又快速增大,在洞尾部比值为1左右.从上面的变化规律可以得出,轴向与环向动量在洞子的起始位置时数值显著不同,但在洞子的尾部时却趋于相同.

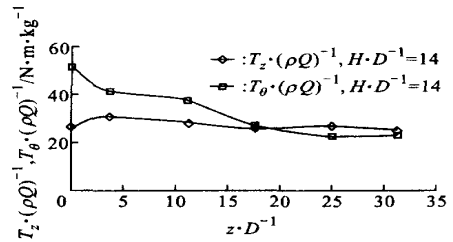


图4 单位质量流体的动量随 z/D 的变化

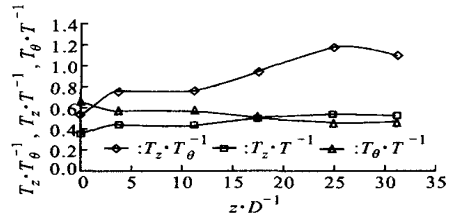


图5 轴向与环向动量相对值随 z/D 的变化

315 空腔环流的能量损失与消能率

图6为空腔环流的单位质量流体的总能量损失 E_f/Q 沿 z/D 的变化规律.由图可见,总能量损失的沿程变化规律也具有明显的分段性,与环向水流的动能的沿程变化恰好相反,这表明 E 的变化规律决定着总能量损失与总能量的变化规律.图7为空腔环流的断面总能量损失与断面总能量的比值 E_f/E (即消能率)沿 z/D 的变化规律.由图可见,消能率的沿程变化规律也具有同样的分段性.在起始段洞长只有约4倍的洞径长,但消能率却可达30%以上,在洞子的尾部($z/D=25$),已几乎没有能量的消耗,总消能率可达70%以上.

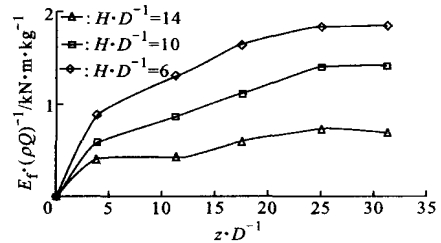


图6 E_f/Q 沿 z/D 的变化

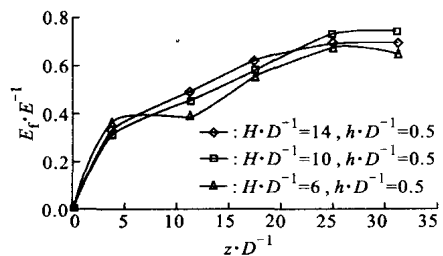


图7 E_f/E 沿 z/D 的变化

4 结 论

水平旋转空腔环流的能动力的转化与沿程变化过程具有明显的分段性,起始段约4倍的洞径长,能动力迅速变化;环向动能的变化规律决定着总能量、总能量损失的变化规律;在起始段,主要是压能迅速减小并转换为轴向的动能,在起始段后压能与轴向的动能沿程的变化均较小且相互对应;环向动能沿程降低;轴向与环向动量在洞子的起始位置时数值显著不同,但在洞子的尾部时却趋于相同.这些特性均体现了因泄水道水平放置,重力与离心力对轴向流动不起作用,因此起旋器出口后初始能动力所具有的沿程自由转换与衰减的特性.起始段只有约4倍的洞径长,但消能率却可达30%以上,总消能率可达70%以上.

参考文献:

- [1] 夏维洪. 苏联的旋转水流消能[J]. 河海科技进展, 1991, 11(3): 29 - 40.

- [2] 董兴林,高季章. 利用导流洞改建为竖井式永久泄洪洞的研究综述[J]. 水力发电,1993(8):47 - 50.
- [3] 夏维洪,王河生. 旋转水流消能及其空化特性[J]. 河海大学学报,1998,26(3):11 - 17.
- [4] 马萍章. 单向涡旋内消能工的试验研究[A]. 第四届泄水工程与高速水流论文集[C]. 成都:成都科技大学出版社,1994. 77 - 83.
- [5] 牛争鸣,孙 静,章晋雄. 竖井进流水平旋转内消能泄水道的泄量特性研究[J]. 水利学报,2003(1):72 - 77.
- [6] 牛争鸣,孙 静,张鸣远. 竖井进流水平旋转内消能泄水道环流空腔直径的变化规律[J]. 水利学报,2003(2):31 - 37.
- [7] 牛争鸣,孙 静,张鸣远. 竖井进流水平旋转内消能泄水道的壁面压力分布规律[J]. 水力发电学报,2002(4):71 - 80.
- [8] 牛争鸣,孙 静,程庆迎. 竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布与消能率的试验研究[J]. 水力发电学报,2003(1):61 - 69.

(编辑 荆树蓉)

(上接第692页)

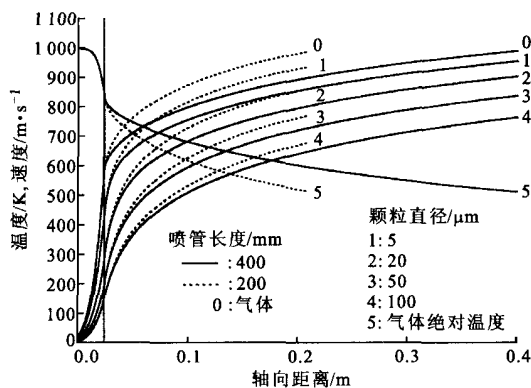


图4 缩放喷管内不同直径的灰尘颗粒被气流拖曳而产生的速度变化情况

的时间.但是,太长的缩放喷管也会带来喷管内边界层的最终汇合和损失的过分增加.

5 结 论

(1) 含尘超音速气流绕凹钝角流动穿过斜冲波时,气流方向发生变化;气流马赫数降低到另一马赫数,但仍然是超音速;含尘气流中的灰尘颗粒在自身

动量的作用下,将基本维持原来的运动方向不变,从而离开原来的含尘气流,使气固两相的分离成为可能.

(2) 为了使灰尘颗粒在穿过斜冲波时,有足够大的速度以获得足够大的动量,可以采用特别加长的缩放喷管,使灰尘颗粒得到充分的拖曳.缩放喷管的长度以喷管内的边界层不汇合和损失不过分增加为原则.

(3) 灰尘颗粒与原来的含尘气体分开后,进入与含尘气体有共同接触界面的另一股超音速气流,并随这股气流带出,原来的含尘气体即净化成所需要的洁净气体.

(4) 采用这种气体净化概念有可能使大于 $5\mu\text{m}$ 的灰尘颗粒和大部分小于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒从含尘气体中清除掉,所得到的净化气体能够满足先进燃煤联合循环和以煤为原料的化工工业中的气体净化的要求.

参考文献:

- [1] 江宏俊. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.

(编辑 荆树蓉)