

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230700

高速明流泄洪洞通气特性研究

王澳华

(中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 鉴于缺乏高流速条件下明流泄洪洞通气特性研究的现状, 基于 50 m/s 量级高速射流试验装置, 研究了流速、通风洞面积、泄洪洞相对高度对通气量和通风洞风速分布的影响; 通过整理和分析 44 组原型观测资料和 28 组试验数据, 提出了高流速下的通气量计算经验公式。结果表明, 水流速度为 18.0~37.2 m/s 时, 通气量测量值为规范计算值的 2.1~9.6 倍; 随着通风洞面积增加, 通风量增长速率逐渐降低, 且通风洞内的风速分布情况与通风洞面积有关; 随着泄洪洞相对高度的增加, 通风量先增后减, 泄洪洞相对高度的变化不改变通风洞断面的风速分布特征; 改进公式的通气量计算值与实际测量值较为接近, 其中 3/4 数据位于 20% 误差线范围以内。研究成果可为工程实践提供指导。

关键词: 通气量; 高速水流; 明流泄洪洞; 通风洞

中图分类号: TV651.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0104-04

1 引言

目前正在建设和即将建设的大型水利水电工程中, 多数设有体型复杂、流速高、单宽流量大的大型泄洪隧洞。泄洪洞闸门后的空气被高速运动的水流迅速携带向下游, 闸门后的气压会迅速降低。当气压低于水的汽化压强时, 闸门及管道空蚀破坏的可能性增加。因此, 一般在较长的泄洪洞内设置通风洞来保障泄洪洞的安全运行, 合理的通风洞尺寸和通气量的计算就成为研究重点。高流速下泄洪洞洞顶余幅内会产生大量高速运动的激射和飞溅液滴, 进而显著影响通气量。目前, 关于通风洞的研究成果较丰富, 但关于高流速情况下的明流泄洪洞通气特性的研究成果较少。因此, 本文基于 50 m/s 量级高速射流装置, 通过物理试验研究高流速情况下的明流泄洪洞通气特性, 以为工程实践提供指导。

2 试验装置及测量方法

在 50 m/s 量级高速射流试验装置(图 1)上进行试验。现有研究成果^[1-3]表明, 泄洪洞坡度不是影响泄洪洞通气量的主要因素, 所以本文采用平坡体型进行试验研究。试验系统主要包括动力

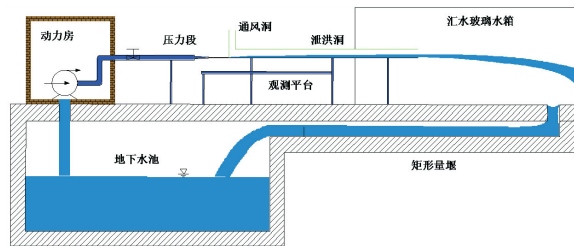


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the testing device

房、地下水池、有压段、明流段、汇水玻璃水槽、矩形量堰六部分。高速水流由离心式水泵提供, 最大扬程为 218.4 m, 额定流量为 45 L/s。试验模型泄洪洞段由压力段、通风洞和明流段三部分构成。有压段末端与泄洪洞明流段相连, 明流段总长 6.2 m, 底板宽 10 cm, 边墙最大高度 28 cm。通风洞设置于明流段前端, 与泄洪洞同宽, 高 60 cm。

试验使用的风速测量仪为左显 JY3000-S 型皮托管风速仪, 风速测量范围为 0~100 m/s, 分辨率为 0.01 m/s, 精度 $\pm 2\%$ 。沿通风洞纵向从上到下间隔 20 cm 设置三个测量断面(断面 T-1、T-2、T-3), 每个断面布置若干测点, 测点间隔 2.5 cm, 每个测点重复记录三次取平均值作为该测点的最终风速值, 通风洞测点布置见图 2。

3 试验方案及成果分析

收稿日期: 2023-05-04, 修回日期: 2023-06-23

作者简介: 王澳华(1997-), 男, 硕士, 研究方向为高速水力学, E-mail: wang_aohua@ctg.com.cn

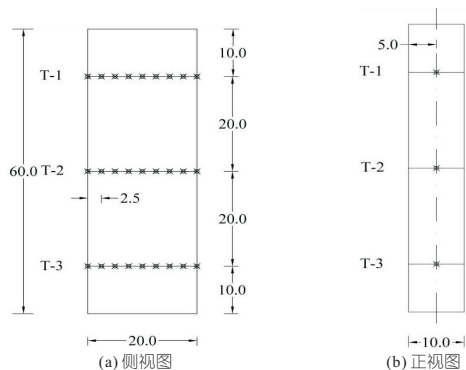


图 2 通风洞测点布置图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of ventilation tunnel measurement points

3.1 试验方案

基于高速射流装置研究水力和结构因素对通气量的影响,共做了 28 组试验。四组孔口水流平均流速(V_w)分别为 37.2、30.6、24.4、18.0 m/s;四组通风洞面积(A_a)分别为 200、150、100、50 cm^2 ;四组泄洪洞相对高度(h_r ,洞高与闸门开度之比)分别为 28、25、20、15。

3.2 水流速度对通气量的影响

最大通气量计算公式^[4]为:

$$Q_{am} = 0.09V_w A \quad (1)$$

式中, Q_{am} 为最大通气量; A 为管道断面面积。

水流速度与通风量、平均风速的关系见图 3。由图 3 可知,高流速时泄洪洞通气量测量值比规范计算值(式(1)计算值)得出的最大通气量明显要大。当水流速度为 37.2 m/s,通风洞面积为 50 cm^2 时,通气量测量值为规范计算值的 9.6 倍;通风洞内的平均风速为 69.6 m/s,局部风速最大;可达到 77.8 m/s,约为规范规定的通风洞最大限制风速的 2 倍。

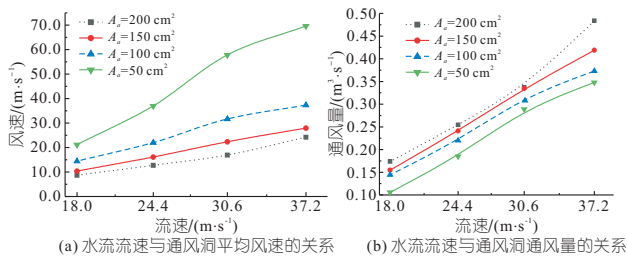


图 3 水流速度与通风洞通风量、平均风速的关系

Fig. 3 The relationship between water flow velocity, ventilation volume, and average wind speed in ventilation tunnels

3.3 通风洞面积对通气量的影响

通风洞面积与通风量、平均风速的关系见图 4。由图 4 可知,随着通风洞面积的增加,通风量增长逐渐缓慢。这是因为在水流速度和泄洪洞洞高一定的情况下,被水流和激射的液滴所带动的空气有限。随水流速度的增加,通风洞的平均风

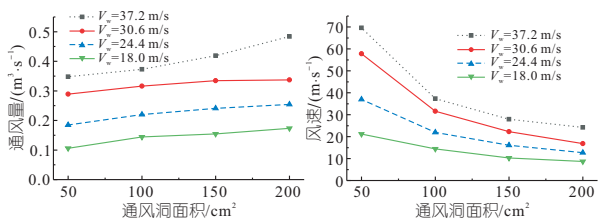


图 4 通风洞面积与通风洞通风量、平均风速的关系

Fig. 4 The relationship between area of ventilation tunnels, ventilation volume, and average wind speed in ventilation tunnels

速随通风洞面积增加而减小的速率越快。例如,通风洞面积从 50 cm^2 增加到 100 cm^2 ,通风洞的平均风速在 $V_w = 37.2$ m/s 时减少的最多,平均风速减少了 32.3 m/s,相当于水流速度的 86.8%; $V_w = 18.0$ m/s 时,此时通风洞的平均风速只减少了 6.7 m/s,相当于水流速度的 37.4%。可见通风洞面积的增加可有效降低通风洞风速,在水流速度较大时尤其显著。

通风洞两侧壁面的风速差和风速相对变化率见图 5,其中 V_1 为靠近泄洪洞有压出口一侧的通风洞壁面风速, V_2 为另一侧的壁面风速, ΔV 为壁面风速差。以 $V_w = 37.2$ m/s, $h_r = 15$ 为例,通风洞测量断面的风速分布情况见图 6。由图 6 可

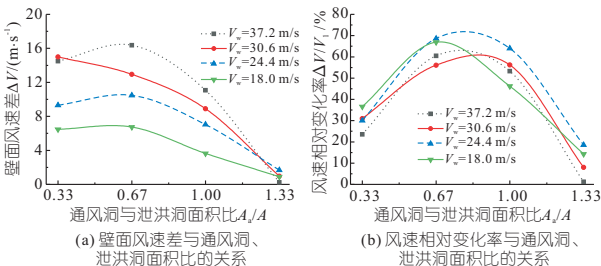


图 5 壁面风速差、风速相对变化率与面积比 A_a/A 的关系

Fig. 5 The relationship between wall wind speed difference, relative change rate of wind speed, and area ratio A_a/A

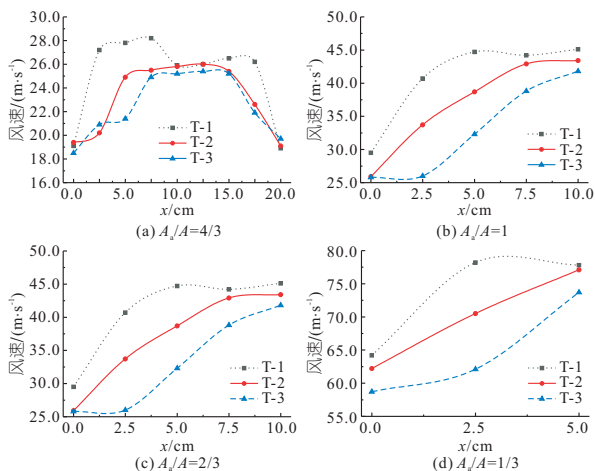


图 6 $V_w = 37.2$ m/s, $h_r = 15$ 时通风洞测量断面风速分布图

Fig. 6 Wind speed distribution map of ventilation tunnel measurement section

知,当通风洞断面面积与泄洪洞断面面积比 $A_a/A=4/3$ 时,断面中部风速最大,向壁面快速减小。当 $A_a/A \leq 1$ 时,靠近泄洪洞有压出口一侧的壁面风速明显小于另一侧壁面风速,随着通风洞面积的增加,壁面风速差值和风速相对变化基本上均表现出先增后减的变化规律。

3.4 泄洪洞相对高度对通风量的影响

以 $A_a=100 \text{ m}^2$ 为例,泄洪洞相对高度与通风量的关系见图 7。由图 7 可知,通风量随着泄洪洞相对高度的增加先增后减,这是因为随泄洪洞高度的增加,喷射和四溅的液滴能够影响更多空间,进而带动更多空气,但随着泄洪洞高度的继续增加,一方面泄洪洞洞尾会出现逆向补气,另一方面喷射和四溅的液滴所能影响的空间有限,所以由通风洞提供的风量就会减少,此时再增加泄洪洞高度也不会显著提高通风量。

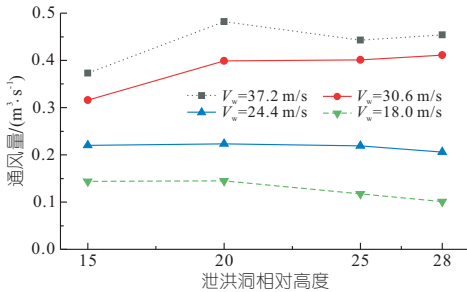


图 7 泄洪洞相对高度与通风量的关系

Fig. 7 The relationship between the relative height of spillway tunnels and ventilation volume

以 $V_w=37.2 \text{ m/s}$, $A_a=100 \text{ cm}^2$ 为例,通风洞测量断面的风速分布见图 8。相对于通风洞面积,泄洪洞相对高度对通风洞风速分布影响较小。

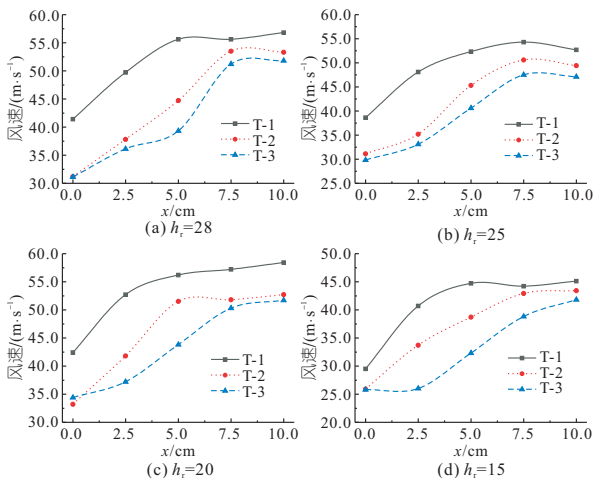


图 8 $V_w=37.2 \text{ m/s}$, $A_a=100 \text{ cm}^2$ 时通风洞测量断面风速分布图

Fig. 8 Wind speed distribution map of ventilation tunnel measurement section

横向上,通风洞三个测量断面的风速均遵从相同的分布规律,即断面中部风速最大,向壁面逐渐减小,且远离泄洪洞有压出口一侧的壁面风速明显大于另一侧壁面风速。这说明泄洪洞的洞高只影响通风洞的通风量大小,而不改变通风洞断面的风速分布特征。

4 高速明流泄洪洞通气量经验公式

本文整理了国内外 11 条明流泄洪洞共 44 组原型观测数据^[5-6],并结合 28 组试验数据对式(1)进行验证。如图 9 所示,式(1)对中小型工程通气

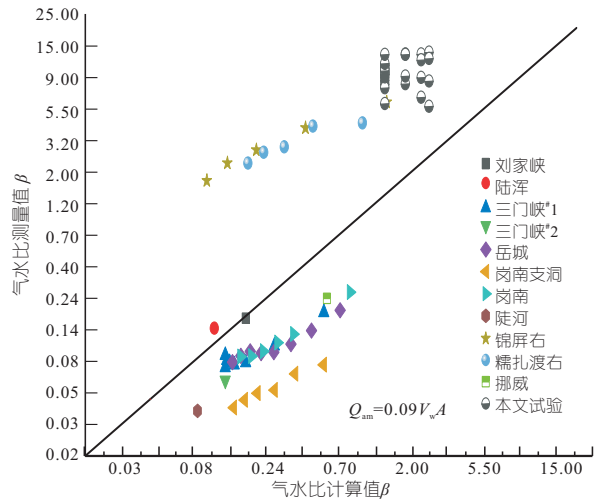


图 9 式(1)通气量计算值与测量值对比

Fig. 9 Comparison between calculated and measured ventilation values in equation (1)

量的预测偏大;对大型工程和本试验通气量的预测偏小,实测通气量约为计算值的 5 倍。这是因为式(1)假设泄洪洞内的水流有明显自由面,沿程水流深度不会发生明显变化,且未考虑到高流速情况下喷射和飞溅的液滴对通气量的影响。这显然与以大流量、大流速为特征的大型工程实际情况不符。因此,本文基于规范公式,假设由液滴运动产生的通气量为水流速度、通风洞面积及泄洪洞相对高度的函数,得到了计算最大通气量 Q_{am} 的经验公式为:

$$Q_{am} = k_1 V_w A + k_2 V_w A_a / h_r \quad (2)$$

式中, k_1 、 k_2 均为常数。

式(2)中等式右边第一项为结构因素和水力因素对通气量的影响,等式右边第二项为液滴运动对通气量的影响。基于两个大型工程及本试验的通气量数据,拟合得到经验系数 $k_1=0.381$ 、 $k_2=3.841$,通气量计算值与测量值的对比见图 10。由图 10 可知,式(2)计算的通气量与试验及

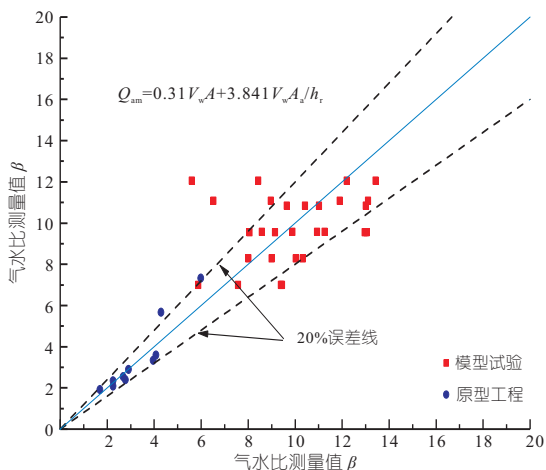


图 10 式(2)通气量计算值与测量值对比

Fig. 10 Comparison between calculated and measured ventilation values in equation (2)

原型观测通气量数据较为接近,数据集中在 45° 线附近,其中 $3/4$ 的数据位于 20% 误差线范围以内,且通气量计算值未出现明显较测量值偏小的情况,拟合结果较优。

5 结论

a. 基于 50 m/s 量级高速射流装置试验成果和原型观测资料,综合考虑水力因素、结构因素及液滴运动对通气量的影响,提出了适用于高流速的通气量计算经验公式,将规范公式通气量计算近 80% 的误差降低到了 20% 。

b. 由于高速水气二相流问题的复杂性,对高速明流泄洪洞通气特性问题的研究仍存在许多不足。后续需进一步开展高流速、大比尺的模型试验,研究通风洞结构型式、通风洞布置方式对泄洪洞通气量的影响;进一步研究高速明流泄洪洞内的水气耦合机制,为通气量的准确计算奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 水利部科学技术局,电力工业部科学技术委员会. 水利水电科技进步(第一册)[M]. 北京:水利出版社,1980: 138-148.
- [2] 陈肇和,黄文杰. 官厅水库泄洪管道需气量规律的研究[J]. 海河水利,1983(2):23-30.
- [3] 陈肇和,黄文杰. 河北省三座大型水库泄洪洞需气量的原型规律研究[J]. 华北水利水电学院学报,1984(1):4-18.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范:SL 74-2019[S]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [5] 水电部第十一工程局勘测设计研究院. 科研成果汇编(水工分册)[M]. 三门峡:三门峡市印刷厂,1975.
- [6] 水电部第十一工程局勘测设计研究院. 管道通气管的设计《水利水电钢闸门设计规范》专题总结[R]. 三门峡:水电部第十一工程局勘测设计研究院,1976.

Study on Ventilation Characteristics of High Velocity Open Flow Spillway Tunnel

WANG Ao-hua

(China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610000, China)

Abstract: Considering the lack of research on the ventilation characteristics of open flow spillway tunnels under high flow velocity conditions, based on a 50 m/s high-speed jet test device, this paper investigated the effects of flow velocity, ventilation tunnel area, and relative height of spillway tunnels on the ventilation volume and wind speed distribution in ventilation tunnels. By analyzing 44 sets of prototype observation data and 28 sets of experimental data, an empirical formula for calculating ventilation at high flow rates was proposed. The results show that the measured value of ventilation is 2.1-9.6 times of the standard value when the water flow velocity is $18.0\text{--}37.2\text{ m/s}$. As the area of the ventilation tunnel increases, the rate of increase in ventilation volume gradually decreases, and the distribution of wind speed inside the ventilation tunnel is related to the area of the ventilation tunnel. The ventilation volume first increases and then decreases with the increase of the height of the spillway tunnel, and the change in the relative height of the spillway does not change the wind speed distribution characteristics. The calculated ventilation value by the improved formula is relatively close to the actual measurement value, with $3/4$ of the data within the 20% error line range. Research results can provide guidance for engineering practice.

Key words: ventilation volume; high velocity flow; open flow in spillway tunnel; ventilation tunnel