

深孔泄洪洞工作(闸)弧门下游水流空化特性分析

张逸军¹, 尹进步²

(1. 陕西省宝鸡峡引渭灌溉管理局, 陕西 咸阳 712000; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 深孔泄洪洞工作弧门下游体型及弧门开启方式决定着水流流态的变化, 选择不合理有可能引起底板的空蚀破坏。为了明确与此相关的空蚀发生机理及条件, 通过水力学模型试验, 并结合简单数值模拟计算, 对不同体型、不同水头、不同开度条件下的水流空化与空蚀特性进行研究。研究表明: 受弧门出口射流流场分布影响, 弧门下游抛物线及下游陡坡初始段底板压强随着底板以上总水头的增加及弧门开度的减小会快速下降, 最大负压接近或超过 -14 kPa, 连接闸室与抛物线之间的水平段长度增加 5 m, 虽然可以使底板压强有一定幅度增加, 但高水头、小开度工况下的水流最小空化数仍然比较小, 最小值不足 0.2 ; 如果以 0.2 作为抛物线及其上下游段水流初生空化数, 同时底板的施工平整度有所控制, 则总水头 40 m 时弧门最小开度可以达到 $1/4$, 若总水头增加至 65 m 时, 弧门只能全开或 $3/4$ 开度运行, 低海拔地区或水平段加长 5 m 后最小开度可到 $1/2 \sim 3/4$ 。

关键词: 泄洪洞; 工作弧门; 抛物线; 压强; 水流空化特性; 模型试验

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0168-06

Flow cavitation characteristics in the downstream of a service radial gate of a deep spillway tunnel

ZHANG Yijun¹, YIN Jinbu²

(1. Shaanxi Baoji Gorge Irrigation Administration, Xianyang 712000, China; 2. Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The flow regime change of the deep spillway tunnel is determined by the downstream flow shape and opening mode of the service radial gate. Unreasonable arrangement may cause cavitation damage to the gate floor. In order to clarify the mechanism and conditions of cavitation damage based on the hydraulic model test and simple numerical simulation, the cavitation and its erosion characteristics of water flow under different shapes, water heads and opening angles were studied. The results show that due to the influence of the jet flow field distribution at the gate outlet, the gate floor pressure rapidly decreases with the increase of the total water head and the decrease of the gate opening in the downstream of the radial gate and the initial section of the downstream steep slope and the parabola, with the maximum negative pressure approaching or exceeding -14 kPa. With an extension of 5 m between the lock chamber and the parabola, the floor pressure can increase to a certain level, but the minimum cavitation number of the flow under the condition of high head and small opening is still relatively small, which is less than 0.2 . If 0.2 is taken as the initial cavitation number of the parabola sections, meanwhile, the construction unevenness of the gate floor is controlled; the minimum opening of the radial gate can reach $1/4$ when the total water head is 40 m. If the water head increases to 65 m, the radial gate can only operate with full opening or $3/4$ opening, and the minimum opening can reach $1/2 \sim 3/4$ in low altitude area or after the horizontal section is extended for 5 m.

Key words: spillway tunnel; service radial gate; parabola; pressure; flow cavitation characteristics; model test

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-17

作者简介: 张逸军(1966-), 男, 陕西旬邑人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程建设与管理。

通讯作者: 尹进步(1968-), 男, 陕西礼泉人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事工程水力学问题研究。

1 研究背景

泄洪洞作为一种主要的泄洪建筑物被许多工程所应用。有些工程泄洪洞是根据工程枢纽布置及泄洪运行水头需要而设置,还有一些是结合工程施工期的导流洞经后期改建而成^[1-6]。根据施工导流洞改建的泄洪洞布置形式一般有两类,一类是按传统形式布置,另一类有可能被改建为竖井旋流式或洞塞式泄洪洞。近几年虽然关于竖井旋流泄洪洞的洞内消能相关研究成果较多^[7-10],其也具有雾化程度低等诸多优点,但受泄洪规模及可参考的已建工程数量少等因素限制,目前使用量比较少,多数工程泄洪洞布置仍以传统形式为主。传统泄洪洞一般由以下几部分构成:进口段、有压段、检修闸室段、工作闸室段、泄槽段及出口消能段。进口段一般布置于水下一定深度处,有压段及明流泄槽段一般依托地形条件布置,出口消能段根据出口位置采用底流或挑流消能布置形式。受有压段与泄槽段地形条件限制,检修闸室段和工作闸室段基本根据有压洞地形及洞线位置布置,有的将检修闸室段与进口结合在一起设置为进水塔布置形式,有些设置于有压洞中间某一位置,也有的和工作闸室段布置在一起组成共用闸室段或中闸室^[11]。工作闸室段的底板由两部分构成,前一段是有压段后的平底段,该段一直延伸至弧门下缘之后一定长度,之后为衔接平底与下游泄槽陡坡连接的抛物线段。由于闸室位置一般根据上游有压段与下游陡槽段所确定,闸室的平底段长度与抛物线水平长度也因此被确定。闸室段总长度变化范围非常有限,而抛物线长度又必须结合压坡后的水流流速确定,致使弧门下游平底段长度的可变化幅度一般都比较小。

检修平板闸室基本为有压水流运行,只要门槽设计合理,无论哪种布置形式,水流运行基本不受影响,运行一般比较安全。相对而言,工作闸室既要控制流量,又要承担泄洪洞有压水流向无压明流转换的过渡作用,特别对一些深孔泄洪洞而言,其运行水头高且体型复杂,闸室下游水流运行安全问题相对较多。许多工程运行发现,无论是平底段的长度,还是抛物线的体型,或者闸室的开启方式均可能对水流流态产生影响,导致弧门后形成水流空化现象,空化严重时底板甚至出现空蚀破坏问题。

本文根据某抽水蓄能电站下水库泄洪洞建筑物构建了深孔泄洪洞工作门局部水力学试验模型,通过水力学模型试验测试与资料分析,结合数值模拟

计算结果,对工作闸室下游段水流的空化特性规律及机理进行了研究。

2 水力学模型制作及试验方案

制作的深孔泄洪洞工作闸室及其前后结构体型模型布置形式如图1所示。模型长度比尺为1:30,由于测试重点在于工作闸室段,因此模型未设置检修闸室,只选取了进口段、部分有压段、工作闸室及部分泄槽段进行制作。由于缺少了检修闸室及部分有压洞段的部分水力损失,相对实际工程而言,出口流速可能偏大。工程原型有压段洞径为 $D=6.5\text{ m}$,工作弧门出口为 $5.8\text{ m}\times 4.8\text{ m}$ ($b\times h$),出口段与下游泄槽宽度均为 5.8 m ,闸室水平底板下游接方程为 $y=x^2/230$ 的抛物线,其水平方向总长度为 9.2 m ,抛物线下游接 $i=0.08$ 的陡坡。为了分析闸室与抛物线之间的水平段长度对水流空化特性的影响,模型首先按原工程设计的弧门底缘下游平底长度 2.78 m 进行制作(即短水平段方案),测试结束后再将水平长度增加 5 m ,其下游顺延,即总长度按 7.78 m 再次进行模型制作和试验测试(即加长水平段方案)。

两个方案试验均按进口底板以上总水头及弧门不同开度分别进行多个组次的测试,进口底板以上总水头分别为 40 、 55 、 65 m ,是工程中比较常用的水头运行范围。弧门开度分别为全开(4.8 m)、 $1/2$ 开度(2.4 m)、 $1/4$ 开度(1.2 m)及 $1/6$ 开度(0.8 m)。考虑一般工程泄洪洞与溢洪道或表孔泄洪建筑物联合应用时,其主要为满足溢洪道或表孔堰面附近水位的泄洪需求,因此底板以上总水头的最大变幅取 25 m 。弧门开度也是按照常规工程泄洪洞可能面临的不同开度需求而确定。试验主要对每个组次的过流量、抛物线及其上下游底板压强进行测试,同时也对特征断面水深进行测试。

3 试验结果与空化特性分析

3.1 短水平段方案压强分布

试验从压坡起始断面至下游陡坡段的底板上共布置了12个压强测点,其中压坡处3个,压坡出口的水平段1个,抛物线段3个,下游陡坡段5个。但压强测试结果发现,压坡处3个测点基本处于有压水流范围内,压强值比较大,比总水头略小,从第4个测点开始压强出现快速下降现象,下游陡坡段5个测点中的后4个测点的压强基本是一个相对比较均匀的变化过程,因此试验只对压强有明显变化的

中间 8 个测点进行分析。不同作用水头各弧门开度 下各测点压强分布如图 2 所示。

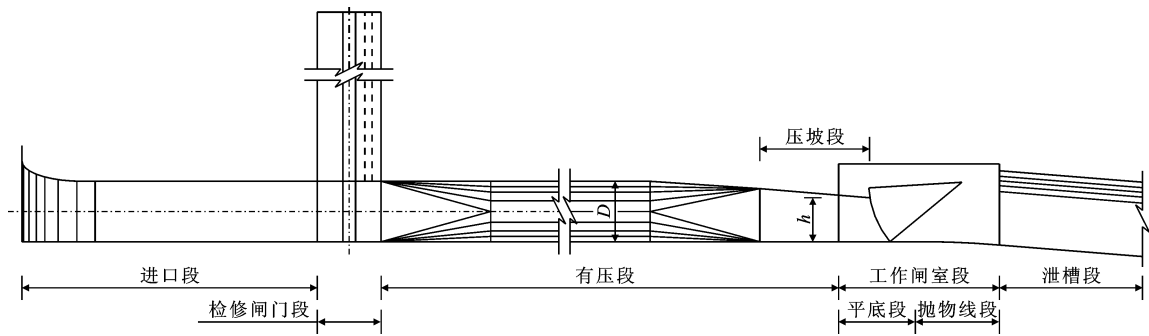


图 1 深孔泄洪洞体型布置示意图

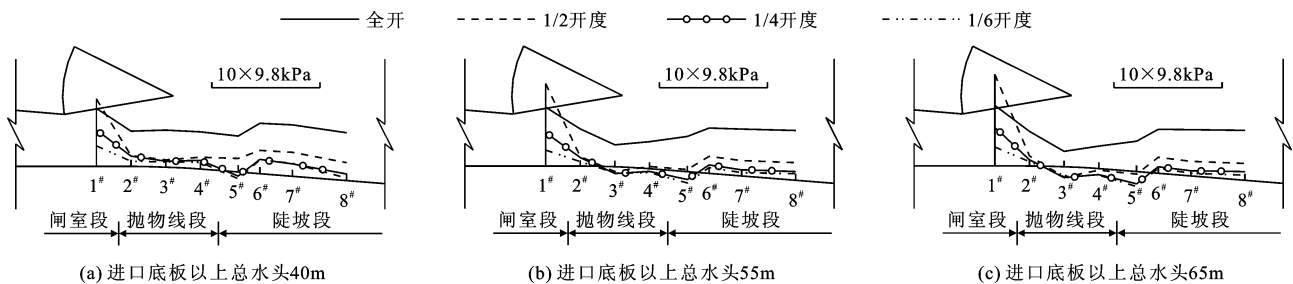


图 2 不同作用水头各弧门开度下短水平段方案各测点压强分布

由图 2 可以看出,底板以上总水头 40 m 时,弧门全开的各测点压强均比较大,随着弧门开度减小,抛物线及下游压强普遍下降,开度减小至 1/4 时,陡坡上的第 1 个测点出现负压,开度减小至 1/6 时,负压值增加至 -6 kPa;底板以上总水头增加至 55 m 时,虽然压强总体变化规律与 40 m 时相同,但局开时压强降低的幅度和负压范围均较大,特别是 1/4 及 1/6 开度时,3[#]~5[#]测点均出现负压,而且呈现负压值随开度减小而不断增加的趋势,最大负压值超过 -10 kPa;底板以上总水头增加至 65 m 时,压强总体变化规律与 55 m 相同,继续呈现负压值随开度减小而不断增加的趋势,负压出现范围也进一步增加,3[#]~5[#]测点在局开时均出现负压,开度减小至 1/4 及 1/6 时,负压值进一步增加,最大负压值接近 -14 kPa。

上述结果表明,随着弧门开度的减小,压强总体呈现减小趋势,随着底板以上总水头的增加压强也呈现减小趋势,即开度最小时,压强减小的幅度可能最大。

为了进一步明确该规律,将图 2 中的不同水头 1/6 开度的压强分布汇总为图 3,从图 3 可以清晰看出,随着水头的增加,小开度负压增加的趋势非常明显。由此可以预测,如果开度进一步减小,负压可能还会进一步增加。

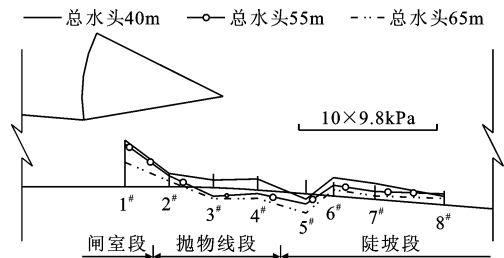


图 3 不同作用水头弧门 1/6 开度下短水平段方案各测点压强分布

3.2 短水平段方案空化特性分析

一般空化现象均发生于压强最小点,从上述压强测试结果可以看出,最大负压基本出现在 5[#]测点,1/2 开度时,3[#]测点负压略大(见图 2(b)、2(c))。对上述几个开度压强最低断面的水流空化数进行计算,计算方法为规范推荐公式,为了使空化特性具有一定的地区代表性,海拔高程选择 700 m,计算中断面平均流速根据水深和流量测试结果计算得到,汽化压强按水温 15°C 选取,计算结果如表 1。

从表 1 的计算结果可以看出:(1)随着总水头的增加,几个开度的空化数都在减小,总水头 40 m 时空化数均大于 0.2,总水头增加至 55 和 65 m 后,局开工况水流空化数均减小至 0.2 以下,最小值为总水头 65 m、1/4 开度的 0.133;(2)总水头 40 和 55 m 时,空化数随开度的减小均在不断减小,而总水头达到 65 m 时,空化数在全开至 1/4 开度变化之间仍

保持与前面相同的变化规律,但 1/4 至 1/6 开度之间不再减小,空化数随开度变化的幅度也很小,1/6 开度比 1/4 开度还增加了 0.006,不足 5%。这一分布规律说明水头增加到一定值,开度减小到某一小开度后,水流空化数可能稳定在某一值附近不再大幅度变化。这一分析结果说明,对空化数变化而言,1/6 开度可能是极限,不需要再减小。

3.3 加长水平段方案压强分布

根据短水平段方案测试及分析结果,将闸室与抛物线之间水平段加长 5 m,试验重点对加长水平段方案进行了总水头 55 和 65 m、弧门开度为 1/2、1/4 及 1/6 几个组次的压强及相关参数测试,考虑

到水平段增加 5m 后陡坡段压强可能出现变化的因素,在陡坡段底板增加了 1 个压强测点,试验共进行了 9 个压强测点的分析,其中前 8 个测点位置与原断面重合布置,各组次压强测试结果如图 4 所示。

表 1 短水平段方案各工况极小压强空化数计算结果

底板以上 总水头/m	全开	1/2 开度	1/4 开度	1/6 开度
40	0.588	0.373	0.360	0.228
55	0.360	0.216	0.199	0.166
65	0.270	0.174	0.133	0.139

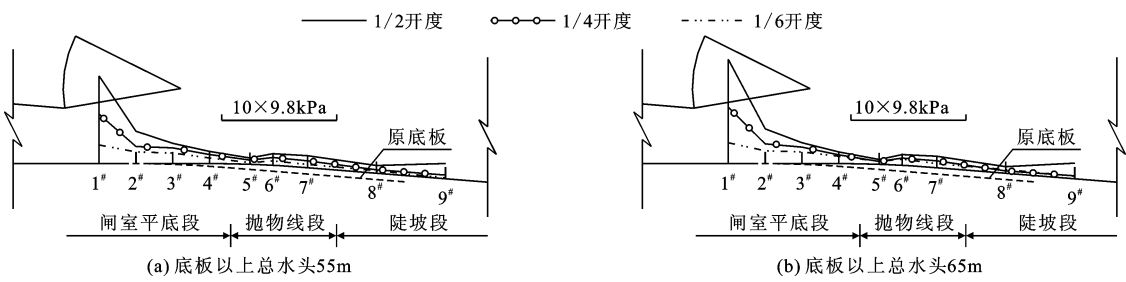


图 4 不同作用水头各弧门开度下加长水平段方案各测点压强分布

从图 4 中可以看出,水平段的加长使抛物线位置后移了 5 m,最小压强值仍出现在 5[#]测点附近,但加长后压强值普遍有所提高,压强分布呈现出与图 2 测试结果不同的分布规律:(1)水平段、抛物线段及陡坡起始段压强均为正压,虽然个别测点压强仍然偏小,但始终无负压出现;(2)水流出弧门压强值快速下降后变化比较平稳,虽然最小值仍出现在抛物线段,但总体无明显波动现象,压强变化幅度均很小;(3)开度对压强值有一定的影响,1/2 开度时压强值略大,1/4 及 1/6 开度时,抛物线与陡坡段压强值均较小,但随着总水头的增加,压强值的变化不是非常明显,基本都在 0~10 kPa 之间变化。

3.4 加长水平段方案空化特性分析

采用与短水平段方案相同的方法对水平段加长后的水流空化数进行计算。断面平均流速取值与前面相同,仍根据水深和流量测试结果计算得到,压强依然取各组次极小压强值。各组次水流空化数计算结果如表 2 所示。

表 2 加长水平段方案各工况极小压强空化数计算结果

底板以上总水头/m	1/2 开度	1/4 开度	1/6 开度
55	0.248	0.226	0.191
65	0.197	0.174	0.168

从表 2 与表 1 的空化数比较可以看出:(1)随

着水平连接段的加长,压强随之提高后,水流空化数也普遍有所增加,总水头 55 m、开度 1/4 时水流最小空化数已超过 0.2,达到 0.226,总水头 65 m 时,各开度的水流最小空化数均已超过 0.16;(2)空化数随水头及开度的变化规律与短水平连接段基本相同;(3)仍有几个工况水流空化数低于 0.2。

4 弧门出口段底板空化问题讨论

4.1 空化特性及机理

通过前面不同总水头、弧门开度等参数变化后的水流最小空化数分析结果发现,当总水头低于 40 m、弧门开度不是特别小时,弧门出口段最小水流空化数基本在 0.3 以上,弧门开度较小,水流最小空化数有可能低于 0.3;当总水头超过 40 m,接近 55 m 及以上时,只有开度较大时,最小空化数才可能大于 0.3,否则随着开度的减小,最小空化数会快速降至 0.3 以下,随着水头的进一步增加,最小空化数有可能降至 0.2 以下,甚至于小于 0.15;虽然通过增加闸室与抛物线之间的底板水平段长度可以使压强尽可能不出现负压,水流空化数有所增大,但随着开度的减小,高水头下的水流最小空化数仍小于 0.2。

从所有最小压强及空化数出现的断面位置看,基本位于抛物线段或其后断面,虽然在此类型式设

计中,抛物线能较好地完成闸室与下游陡坡之间的过渡,但抛物线却改变了闸室后水流的连续性,特别是闸门小开度条件下改变现象更加明显。为了对该段水流流态有一个相对比较清楚的分析,考虑到由于物理模型缩尺影响,难以准确显示流态变化,参考同类工程数值模拟计算方法^[12-13],此处利用数值模拟,对弧门小开度条件下闸室下游局部水流流态进行详细模拟计算。计算得到的总水头 40 m、弧门开度为 1/6 时闸室后水流流态及压强分布云图如图 5 所示。

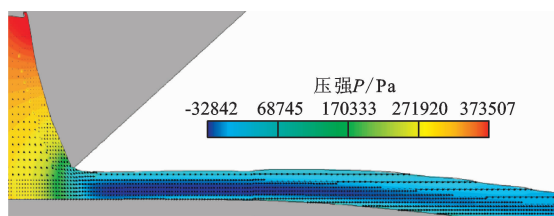


图 5 总水头 40 m、1/6 开度弧门下游水流流态及压强分布

由图 5 可以看出,虽然弧门开度较小,但水流出闸室在平底初始段的短距离内基本为均匀射流状态,在水平段末端射流受空气阻力及水面掺气影响,表面略有上升。与此同时底部开始逐渐进入抛物线的曲线段,出现微小的脱壁现象,再继续向下游流动过程中,水流一方面保持水平方向的惯性运动,另一方面受重力作用,主体出现向下倾斜的趋势,水流出出现总体导向现象。通过该流态过程分析可知,正是水平方向的惯性运动导致水流在曲线段出现脱壁及压强减小现象,图 5 中总水头只有 40 m,弧门出口流速相对较低,所以负压总体较小,随着水头进一步增加,保持水平方向惯性运动的流速也会随之增加,则曲线段负压会进一步增大,最终出现空化数减小的趋势。

如果将闸室与抛物线之间的水平段加长,则出弧门的射流只受到空气阻力及水面掺气影响,水深会逐渐增加,底部在初始段不会出现脱壁现象。水流在水平底板运行一定距离后,水深有一定幅度增加,流速会有所减小,此时再进入抛物线曲线段后,底部脱壁现象会有所减缓,压强虽然也可能下降,但仍比短水平连接段的压强大,因此空化数相对而言会有所增加。

4.2 空蚀破坏的可能性及弧门开度控制

许多工程泄洪洞先后出现不同部位的空蚀破坏,根据资料统计发现,早期大量导流洞被改建为龙抬头式泄洪洞,其进口位置比较高,即进口底板以上总水头相对较低,因此大量破坏发生在泄槽下游的

反弧段及其下游段,美国的黄尾坝及我国的刘家峡等工程均出现过此类破坏^[14-15]。近几年随着坝高的增加,由于已经设置了溢洪道或表孔泄洪建筑物,一些工程泄洪洞进口设置相对较低,导致其工作门下游的水头与流速相对较高,因此部分工程在工作门出口及下游也出现了不同程度破坏现象。前面分析已经表明,深孔泄洪洞受弧门开度和工作水头影响,部分工况的抛物线段及其下游段水流空化数比较低,都可能是空蚀破坏极易发生的部位,因此有必要对其空蚀破坏的可能性进行分析。

文献[15]对泄洪洞反弧段及其上、下游的水流初生空化数进行研究发现,水头在 115 m 以上时,泄洪洞反弧段初生空化数大约为 0.22,陈椿庭对霍尔资料分析后提出空化数在 0.2~0.3 时,要控制过流面的不平整度,美国专家布格认为空化数在 0.12~0.3 时要增加掺气设施,小于 0.12 时就必须修改设计。围绕抛物线段及其上下游体型设计需求,国内先后进行了几个工程的不同试验研究^[15-18],对研究资料进行分析发现,虽然部分工程初生空化数按 0.3 取值,但如果过流面不平整度有一定控制,比较安全的倾向意见认为抛物线上、下游水流初生空化数也可以按 0.2 取值。

按照上述结论对本文两种体型进行分析发现,水头 40 m 时,各种工况的水流最小空化数基本大于 0.2;如果水头增加至 55 m,则短水平连接段体型开度最小只能为 1/2,否则空化数就小于 0.2,水平连接段加长 5 m 后最小开度为 1/4;水头再进一步增加至 65 m,短水平连接段体型只能全开,加长后最小开度为 1/2。为了分析海拔高程对其影响,又按上述计算方法对海拔增加至 2 000 m 的空化数进行计算发现,水头 40 m 时,两种体型最小开度均为 1/4;水头增加至 55 m 后,水平段加长后最小开度为 1/2,短水平连接段最小开度为 3/4;水头再增加至 65 m 后,短水平连接段体型只能全开,水平段加长后开度 1/2 时空化数为 0.197,推测开度为 3/4 时空化数可能会大于 0.2。

上述分析结果说明,如果控制好平整度,以 0.2 作为抛物线及其上、下游初生空化数界限,则 40 m 以下水头,弧门最小开度可控制为 1/4,随着水头增加,弧门最小开度界限会逐渐增加,水头达到 65 m 后,高海拔地区弧门只能全开,低海拔地区虽然通过增加水平连接段长度可以适当局开,但开度也不能小于 1/2~3/4。

5 结 论

通过物理模型试验与数值模拟计算相结合的方法对深孔泄洪洞工作弧门下游底板的水流空化与空蚀问题进行了分析,分析结果表明:

(1)受弧门射流流场分布影响,弧门下游抛物线及下游陡坡初始段底板压强随着底板以上总水头的增加及弧门开度的减小会快速减小,最大负压接近或超过 -14 kPa ,连接闸室与抛物线之间的水平段长度增加 5 m 后,虽然可以使底板压强有一定幅度的增加,但高水头、小开度工况下的水流最小空化数仍然比较小,最小值不足 0.2 。

(2)如果确定深孔泄洪洞抛物线及其上、下游段水流初生空化数为 0.2 ,而且底板平整度得到一定控制,则总水头 40 m 时弧门最小开度可以达到 $1/4$,若总水头增加至 65 m ,弧门只能全开或 $3/4$ 开度运行,低海拔地区或水平段加长 5 m 后弧门最小开度可到 $1/2\sim 3/4$ 。

(3)本文研究是在抛物线方程确定的条件下进行,但实际抛物线体型对水流空化与空蚀特性也具有一定影响,相关问题有待进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 刘嘉夫,齐 昕. 龙抬头水电站泄洪洞水力特性研究[J]. 水利水电技术,2019,50(2): 139-143.
- [2] 王继敏,杨 弘. 锦屏一级水电站泄洪消能关键技术研究[J]. 人民长江, 2017,48(13): 85-90.
- [3] 罗永钦,刁明军,何大明,等. 高坝明流泄洪洞掺气减蚀三维数值模拟分析[J]. 水科学进展,2012,23(1): 110-116.
- [4] 郭 军,张 东,刘之平,等. 大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J]. 水利学报,2006,37(10):1193-1198.
- [5] 罗树焜,李连侠,褥勇伸,等. 布西水电站泄洪洞阶梯消能布置方案数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 50-56.
- [6] 杨志明,郑 洪,詹双桥. “龙落尾”布置形式在高速水流泄洪洞中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019, 17(2):105-108.
- [7] 田 忠,许唯临,刘善均,等. 组合式洞塞消能工的数值计算[J]. 水利水电科技进展,2005(3):8-10.
- [8] 郭新蕾,夏庆福,付 辉,等. 新型旋流环形堰竖井泄洪洞数值模拟和特性分析[J]. 水利学报,2016,47(6):733-741+751.
- [9] 南 洪,贺 威,韩鹏辉,等. 查日扣水电站竖井旋流泄洪洞水力学数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015,13(5):204-207.
- [10] 赵 洋,牛争鸣,李奇龙,等. 水平旋流内消能泄洪洞段与尾水洞段流态适用性研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):187-191.
- [11] 马旭东,杨 庆,聂锐华,等. 中闸室弧形闸门关闭过程中泄洪洞水力特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(2):1-7.
- [12] 姜 攀,尹进步,何武全,等. 有压泄洪洞弯道压力特性数值模拟与试验研究[J]. 水力发电, 2016,42(2):49-53.
- [13] 王海军,张 凡,李会平. 溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):128-132.
- [14] 夏毓常. 泄水建筑物若干体型初生空化数的合理取值[J]. 长江科学院院报, 2000,17(2):6-9+13.
- [15] 夏毓常. 判别泄洪洞反弧段发生空蚀的水力特性标准[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 50-54.
- [16] 王均星,王汉辉,雷川华,等. 云龙水库泄洪洞空蚀及体形优化研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2003,36(1):17-20.
- [17] 马吉明. 有关龙抬头泄洪洞水力设计的几个问题[J]. 水利水电技术, 1995(2):16-19.
- [18] 蒙富强. 长河坝水电站泄洪洞掺气减蚀设施设计[J]. 水力发电,2016,42(10):36-38.