

大古水电站坝前排沙运行方式与排沙漏斗形态

王芳芳^{1,2}, 吴时强¹, 高 昂¹, 薛万云¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为给实际工程排沙设施的设计和布置提供依据,基于1:60整体模型,根据淤积泥沙扬动流速相似原理,试验研究大古水电站2条排沙廊道和1个底孔在不同运行方式下坝前库区的排沙效果和排沙漏斗形态。结果表明:排沙洞开启顺序对最终排沙效果影响不大;深水条件下,坝前排沙漏斗形态主要受泥沙特性决定,非黏性沙的排沙漏斗坡度接近于淤积泥沙水下休止角;大古水电站排沙设施的设计方案具备保证电站进水口“门前清”的条件。

关键词:扬动流速;排沙廊道;底孔;排沙漏斗;水下休止角;大古水电站

中图分类号:TV673+.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)02-0051-05

Desilting operation modes and sand funnel patterns in front of Dagu Hydropower Station Dam//WANG Fangfang^{1,2}, WU Shiqiang¹, GAO Ang¹, XUE Wanyun¹ (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on the similarity criteria of incipient velocity, an experimental study is performed on a 1:60 overall physical model to study the sediment flushing effects and sand funnel patterns of two desilting galleries and one bottom tunnel under designed operating conditions to provide a basis for the design and arrangement of the desilting facilities in front of the Dagu Hydropower Station Dam. The results show that the ultimate desilting effect is less affected by the operating order of the desilting tunnels. The patterns of sand funnels are mainly determined by the sediment property, and the slope of the sand funnels is close to the underwater repose angle of non-cohesive sediments under deep reservoir water level. The design scheme for the desilting facilities in Dagu Hydropower Station guarantees the condition of clear in front of the hydropower intake.

Key words: incipient velocity; desilting gallery; bottom tunnel; sand funnels; underwater repose angle; Dagu Hydropower Station

1 水库坝前排沙防淤研究现状

在多沙河流上修建水库或引水工程,会因坝前或取水口前流速降低,水流挟沙能力减弱而造成淤积。随着泥沙淤积的发展,将降低水库有效库容和引水质量,并造成水轮机和泄流建筑物的磨损。为减缓水库泥沙淤积,减少粗沙过机,保证电站等取水口“门前清”,防止淤积造成闸门或孔口堵塞等,工程上一般在引水口附近设置拉沙底孔或排沙廊道等排沙设施。在排沙洞口上游附近,流线急剧收缩,流速迅速增大,大量泥沙起动,发生冲刷;随着冲刷深度增加,水沙分界面的水流流速处于泥沙起动临界

值以下时,冲刷基本稳定,形成以引水口为顶点,向上游及两侧发射的锥形冲坑,形似漏斗,亦称“排沙漏斗”。排沙漏斗是一种经济、高效、节水的防沙和排沙设施^[1],其形成、形态及范围深受泄水、排沙及取水建筑物设计者的关注。

水库排沙设施排沙漏斗的成因、形态及模拟均十分复杂,涉及三维水流结构、淤积物的水下休止角以及模拟的相似率等。目前,研究排沙漏斗的手段多种多样,但对于水库排沙漏斗形态的预测及排沙洞布置方案的优选,还是以模型试验为主^[2-3]。徐国宾等^[4]对坝前局部排沙漏斗模型相似准则进行了研究,考虑了包括坝前水流条件、淤积物黏结力、水

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51409165);国家自然科学基金(51379128)

作者简介:王芳芳(1988—),男,博士研究生,主要从事水工水力学、计算水力学研究。E-mail:ffwang@nhri.cn

通信作者:吴时强(1964—),男,教授级高级工程师,主要从事水工水力学、环境水力学研究。E-mail:sqwu@nhri.cn

下休止角及级配等因素,提出正态模型是满足排沙漏斗形态相似的必要条件,认为要实现泥沙在水平及倾斜床面上的起动相似,除了要满足水平床面上的起动相似条件外,还需满足模型沙与原型沙水下休止角相同的条件。王英伟^[5]对影响坝前排沙漏斗形态的因素进行了归纳,认为坝前淤积泥沙特性及库前水位对排沙漏斗坡度的影响较大,排沙漏斗的坡降和冲深是决定排沙洞底坎高程的主要因素。然而,崔承章等^[6]认为坝前水位和泄流量是影响排沙漏斗纵坡的主要因素,水位较高时纵坡接近模型沙的水下休止角,且纵坡随坝前水位下降而变缓非常明显。归纳而言,排沙漏斗的形成主要受坝前泄流条件、坝区地形、来水来沙条件、水库运行方式及坝前淤积物特性等因素的影响,并具有以下基本特征^[7]:①不同水深和进水方式下,漏斗平面形态差异很大。深水条件下漏斗坡度基本与淤积物水下休止角保持一致,浅水状态下纵坡缓于横坡;正向进水时平面形态接近于半圆形,而侧向进水时漏斗平面形态呈“匙”形。②漏斗范围一般不会很大,原型中一般限于坝前约500 m范围内。③漏斗纵坡一般由坑底段和坡面段组成,前者短而缓,后者长而陡,后者的坡度即为纵坡坡度,不同条件下取值为水下休止坡降的10%~100%。此外,一些研究基于工程实测及模型试验资料,给出了冲坑深度的估算公式^[8-9]。熊绍隆^[8]结合室内水槽试验,解释了在深水条件下下角接近于水下休止角以及浅水中较缓坡度漏斗的形成原因。然而,这些结论还不足以实际工程设计提供充分条件,由于实际工程地质条件、水流条件复杂,往往需要较大比尺的模型试验加以验证^[10-11]。

在模型试验中,模型沙的选取十分关键,大多采用天然沙和轻质沙,常见的轻质沙有粉煤灰、电木粉、塑料沙等。对于无黏性不同粒径天然沙及塑料沙,其漏斗坡度均接近于泥沙的水下休止角,漏斗坑底也不存在坑底平段,仅孔口附近坡度有所减缓^[8]。由此可知模型沙的选取与其物理特性关系十分密切。室内试验的结果与原型观测相差很大,得到的漏斗边坡坡度较原型陡,因此漏斗范围也偏小,这种结果偏于保守,因此对于工程安全是有利的^[2]。

为保证大古水电站安全运行,消除水库淤积对电站引水、防洪安全带来的潜在威胁,本文以大古水电站为例进行排沙漏斗的模拟试验研究。采用模型试验方法对排沙设施的可行性和可靠性进行验证,并研究排沙漏斗形态与水流条件和淤沙特性之间的关系。

2 排沙漏斗模型试验

2.1 工程概况及试验组次

大古水电站^[12]于西藏自治区山南地区桑日县境内,是雅鲁藏布江中游桑日县至加查县峡谷段的第2级电站。电站从左至右分别为左岸溢流坝段、底孔坝段、右岸厂引坝段,在溢流坝段与厂引坝段之间布置泄洪冲沙底孔。发电厂房为坝后式厂房,布置在主河床右侧岸坡,电站装机容量为660 MW,安装4台单机容量为165 MW的混流式水轮发电机组,结合电站进水口、冲沙底孔布置,在进水口下部共设2个排沙廊道,排沙廊道支管与主管间采用非对称“Y”形岔管,主管紧靠底孔布置。

坝址处多年平均悬移质年输沙量为1580万t,多年平均含沙量为0.526 kg/m³,多年汛期平均含沙量为0.708 kg/m³,多年平均推移质输沙量为39.5万t。输沙量年际变化较大,最大年输沙量为多年平均输沙量的3.3倍,为最小年输沙量的17.0倍。输沙量年内分配不均匀,主要集中在汛期(6—9月),占全年输沙量的96.1%,其中7月、8月两月占全年的74.4%。从实测资料分析,坝址处推移质与悬移质之比为2.5%,表明悬移质是库区淤积的主要来源,但由于推移质颗粒大,基本上淤积在库区。根据库区泥沙淤积计算结果,运行15年后库区基本达到冲淤平衡(排沙率超过90%),淤积高程为3406.4 m,坝前淤积泥沙以悬移质为主,约占92.9%。大古水电站水库库容小,正常蓄水位3447 m以下库容与沙量之比仅为4.4:1,水库泥沙淤积速率较快,淤积洲头将很快抵达坝前,存在较严重的淤积问题,需要进行库区坝前拉沙的研究。

排沙设施包括1个排沙底孔和2个排沙廊道,如图1所示。底孔进口段向上游悬出坝面6 m,采用矩形断面三面收缩的喇叭口体型,底板高程为3376.00 m,有压段出口断面为5 m×8 m(宽×高)。排沙廊道2个进口设置于电站进口下方,进口底板高程为2383 m,1号排沙廊道进口以喇叭口形接矩

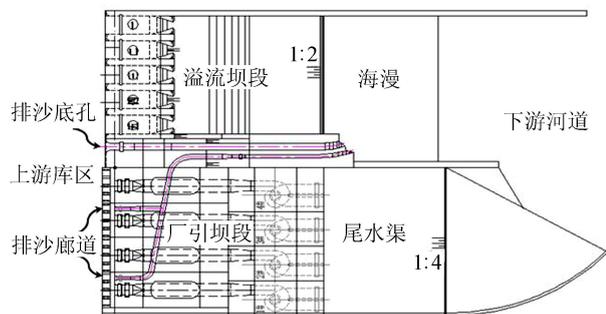


图1 底孔及排沙廊道布置

形断面,再渐变为直径3.5 m的圆管断面,之后接坡度为1.77%的斜管断面。2号排沙廊道进口形式与1号排沙廊道相同,渐变段后以斜坡为9.1%的斜管与总廊道以“Y”形岔管形式相接,排沙廊道有压段总长152.2 m,其中斜坡段长113.2 m,之后圆管断面渐变为矩形断面,再接一压坡段,有压段出口断面为2.8 m×3.5 m(高×宽),工作闸门为弧形闸门,后接平坡明渠,长87.29 m。根据调度运行方式,库区排沙水位为正常蓄水位3447 m和死水位3442 m这2种工况,由于2个廊道过流量相互影响,试验中考虑2个廊道的开启次序,试验组次及排沙运行组合安排如表1所示。

表1 试验组次

编号	库水位/m	淤积高程/m	运行方式
S1	3447	3406.4	底孔+右廊道(先开)+左廊道(后开)
S2	3447	3406.4	底孔+左廊道(先开)+右廊道(后开)
S3	3447	3406.4	单开底孔
S4	3447	3406.4	2个排沙廊道同时开启
S5	3442	3406.4	底孔+右廊道(先开)+左廊道(后开)

2.2 模拟方法

模型以重力相似准则设计,采用正态模型(比尺为1:60),这有利于原型与模型排沙漏斗的相似^[4]。模型上游库区模拟至坝前400 m,由于该河段泥沙以悬移质为主,库区15年冲淤平衡后的淤积高程为3406.4 m,模型悬移质按扬动相似设计,悬沙扬动流速按照窦国仁公式计算:

$$U_c = 0.32 \ln \left(\frac{11h}{K_g} \right) \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + 0.19 \frac{g h \delta + \varepsilon_k}{d}} \quad (1)$$

式中: U_c 为悬沙扬动流速; h 为水深; d 为中值粒径; K_g 为床面平整度,当 $d \leq 0.5$ mm时,取 $K_g = 0.5$ mm,当 $d > 0.5$ mm时,取 $K_g = d$; δ 为薄膜水厚度, $\delta = 0.213 \times 10^{-4}$ cm; ε_k 为黏结力, $\varepsilon_k = 2.56$ cm³/s; g 为重力加速度, $g = 9.8$ m/s²; ρ_s 为泥沙密度, $\rho_s = 2.65$ t/m³; ρ 为水体密度, $\rho = 1$ t/m³。

按照拉沙运行方式,库水位分别为3447 m和3442 m时开启排沙底孔或底孔,15年后坝前淤积高程为3406.4 m,即坝前水深分别为40.6 m和35.6 m。由此可以确定悬沙扬动流速分别为1.89 m/s和1.75 m/s,按照模型比尺,模型沙扬动流速应分别为0.24 m/s和0.23 m/s。为保证泥沙休止角相似,模型沙仍然采用天然沙,由此模型水深分别为0.677 m和0.593 m,按照窦国仁公式,得到在模型水深条件下泥沙中值粒径与扬动流速的关系,如图2所示。由图2可见,接近模型起动流速的模型沙中值粒径约为0.21~0.28 mm,扬动流速约为0.32~0.33 m/s,比相

似性要求的中值粒径略高,即试验结果偏于安全,由于是非黏性沙,此时,深水条件下排沙漏斗的形态主要与模拟沙的水下休止角有关^[8],粒径影响相对较小。据此,模型沙中值粒径取0.271 mm,泥沙颗粒级配如图3所示,与原型混合物颗粒级配基本一致。

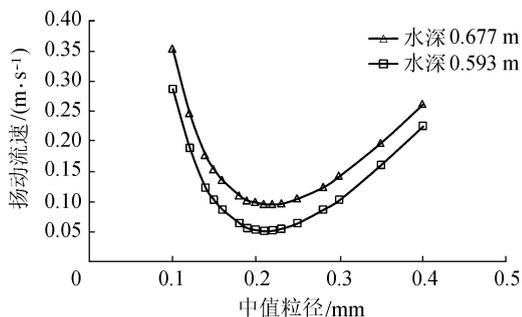


图2 不同模型水深条件下泥沙中值粒径与扬动流速关系

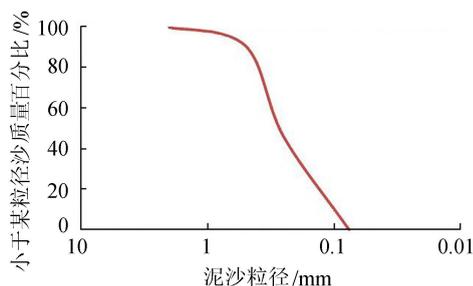


图3 模型沙颗粒级配曲线

试验前先预铺模型沙至高程3406.4 m,库水位为实际运行水位;试验中发现模型冲刷水流挟沙量很快趋于稳定,当出口水流含沙浓度与来流基本一致时,认为泥沙冲淤处于平衡状态,此时停止试验,待库区水抽干后量测排沙漏斗形态。模型排沙漏斗轮廓采用水准仪测量,精度可达1 mm。

2.3 试验现象及结果

通过多组试验对比发现:①在库水位分别为正常蓄水位和死水位情况下均未观测到底孔及排沙底孔的淤塞现象,3个排沙洞的进口前均能形成相对稳定的排沙漏斗,电站取水口泥沙淤积高程均在拦污栅底板以下,能够保证电站取水口“门前清”。②如图4所示,底孔排沙漏斗半径比较大,达60 m左右,坡降约为1:1.73~1:1.82;虽然2个排沙

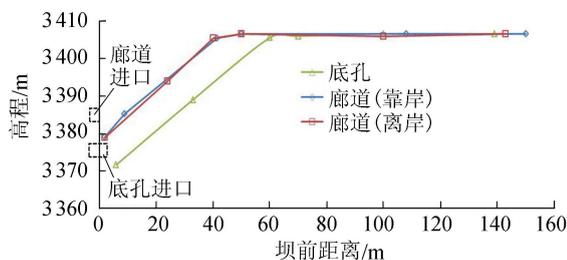


图4 排沙漏斗纵向形态

廊道位置偏离坝中线距离不同,但流量和开启方式对冲刷稳定后的漏斗形态影响不显著,漏斗半径约为40 m,坡降约为1:1.47~1:1.59。③底孔和廊道的排沙漏斗在平面上有重叠,但仍然相互独立,其中底孔漏斗半径比较大,底孔与其旁边的排沙廊道形成的排沙漏斗有较大的重叠,说明3个排沙洞可以覆盖电站进水口区域,具备保证电站“门前清”的条件。④2个排沙廊道形成的漏斗有较小重叠,同时开启时靠岸侧廊道分流较小,但仍能形成较完整漏斗,且漏斗形态变化不大,不同运行组次下漏斗范围均可达到岸边。

无论是底孔还是排沙廊道,试验中均能形成稳定的排沙漏斗,而且在深水条件下,排沙漏斗的稳定形态受排沙运行方式及流量大小影响不明显。本工程2个排沙廊道相互连通,相同水位同时开启情况下,流量分配比约为3.8:6.2,然而最终形成的排沙漏斗形态及范围基本一致,如图5(d)及图4所示。图中底孔漏斗较2个廊道漏斗范围和深度较大,坡度稍缓,是由于进口高程底孔相对较低,流量大得多的原因。底孔进口位于溢流坝段与厂引坝段之间,从漏斗范围看,右岸对电站进水口影响很小,

左岸影响溢流坝中部3号表孔轴线位置;2个排沙廊道漏斗范围均可达到岸边,基本可以保证电站进口“门前清”。因此,在排沙运行时,正常情况下开启2个排沙廊道即可,底孔可在泄洪时配合排沙清淤使用,以增大有效库容。在实际运行时,若排沙洞长久不运行,淤积物容易在进口落淤并板结,因此建议排沙洞要经常运行,以防淤死。

3 讨论

为了便于比较分析,将不同工程库区排沙漏斗的相关研究列于表2。由表2可见,国内众多大型水利枢纽均建有排沙设施,如底孔、排沙廊道等;其布置形式、工程地质条件和水力条件等差异很大。根据已有研究结果,排沙漏斗形态具有一定的相似性和规律性。熊绍隆^[8]将深水条件下的排沙漏斗的特性进行了总结,认为无黏性不同粒径天然沙及塑料沙,其漏斗坡度均接近于泥沙的水下休止角,漏斗坑底不存在坑底平段,仅孔口附近坡度有所减缓。

如表2所示,众多模型试验结果表明在深水条件下,排沙漏斗的纵坡和横坡相差不大,其坡度一般在1:1~1:5之间,深水、小流量条件下坡降一般

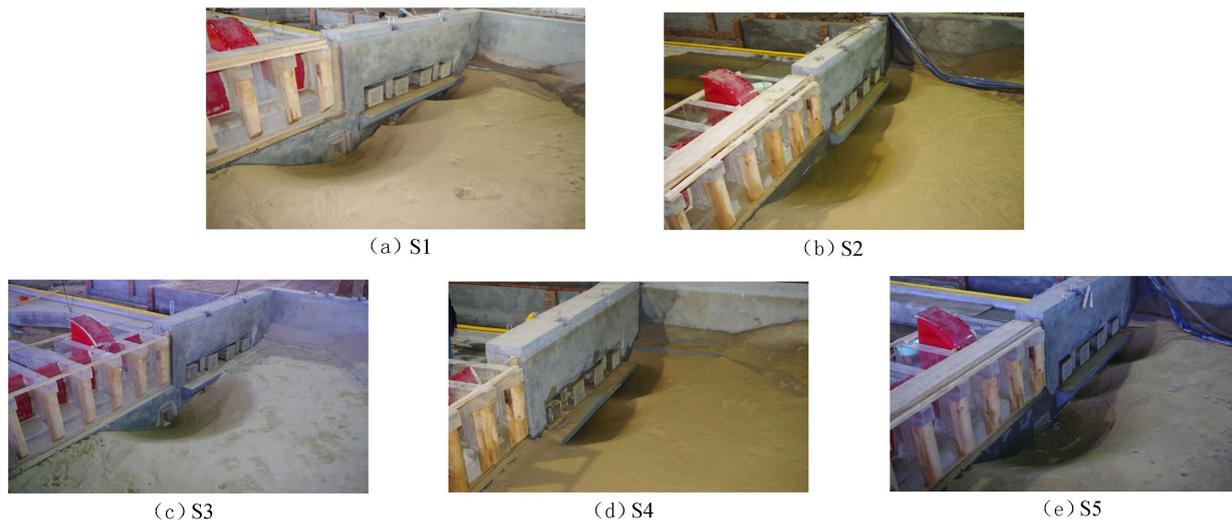


图5 不同试验组次下排沙漏斗形态

表2 不同工程库区排沙漏斗形态模拟结果比较

工程	模拟沙	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	纵向比	横向比	孔前水深/m	孔前淤积厚度/m	建筑物
阿尔塔什坝	电木粉	324~696	1:1.43~1:2.09	1:1.14~1:2.03	55~105	35	
洛古	粉煤灰	776~820	1:2.5~1:3	1:2.5~1:3	40~45	22	底孔
观音岩		550	1:3.5	1:3.5	85	30	底孔
沙坡头	粉煤灰	447	1:2.1~1:3	1:1.8~1:2.5	27.75	22.25	
紫坪铺		1200	1:6	1:3	70	65	排沙洞
三峡	电木粉	3500	1:8.3~1:13.8	1:3~1:3.8	70	35	深孔分散布置
宝石	天然沙	220	1:2.3~1:3.3		26.6~36.6	24.6~33.6	底孔
武都		1400	1:4.8~1:5.7	1:3.8~1:5.1	50	25	深孔
大古	天然沙	1209~1264	1:1.73~1:1.82	1:1.73~1:1.82	59~64	22	底孔
		80~233	1:1.47~1:1.59	1:1.47~1:1.59	59~64	22	廊道

在其淤积物的水下休止角附近。然而,随着流量的增大,水深的降低以及运行条件的变化,也会导致漏斗坡降小于水下休止角的情况,比较明显的是纵向坡度缓于横向坡度,如紫坪铺、三峡等工程。很多实测资料显示,实测排沙漏斗的坡降要缓得多,一般在 $1:5 \sim 1:36$ 之间。一般原型观测到的排沙漏斗形态与模型试验结果相差很大^[2];龚嘴水库排沙漏斗坡降模拟结果为 $1:1.6$,而实际观测纵坡坡降为 $1:10$ ^[13];碧口电站^[14]排沙漏斗设计边坡为 $1:1.6$,而实际观测中侧向边坡在 $1:3.3 \sim 1:7.1$ 之间,纵坡在 $1:10.6 \sim 1:17$ 之间。可见,原型漏斗的坡降比模型缓得多,平面范围大得多。分析其原因,主要是由于水槽试验中选用的泥沙颗粒较粗,泥沙主要以推移质方式输移,有悖于水库淤积平衡前坝前泥沙淤积主要以悬移质和异重流挟沙为主的实际情况^[9],模型试验难以模拟实际工程中泥沙真实的物理成分、淤沙变化过程以及化学反应等;此外,对淤积泥沙的开始启动状态模拟失真,如试验中很难准确模拟排沙洞的淤堵状态。一般来说,在只考虑坝前淤积平衡和排沙洞不被淤死的情况下,模型试验得到的排沙漏斗的坡度及范围一般是偏于保守的。

本工程漏斗坡降均在 $1:1.5 \sim 1:1.8$ 之间,接近于模拟沙的水下休止角,与阿尔塔什坝研究结果^[15]相近,而相对于其他水库坡降略陡,可能源于模拟沙粒径的选取偏粗,启动流速偏大。从安全角度考虑,在模型试验满足设计要求的情况下,实际工程偏安全。由于原型观测结果普遍缓于模型试验结果,大古水电站排沙漏斗设计边坡可按照 $1:3$ 设计,来估算排沙洞进口位置及排沙漏斗范围。

在深水条件下,排沙漏斗形态主要由淤积物物理化学特性及进口高程决定,受水流条件及排沙运行方式影响不明显,其漏斗坡降一般约为淤积物的水下休止角,漏斗规模由漏斗深度即进口高程决定。因此,大古水电站采用2个进口连通的排沙廊道布置方式是可行的,且开启顺序对坝前最终形成的漏斗形态影响不大。

4 结 论

a. 大古水电站库区排沙洞的开启顺序对坝前漏斗形态影响较小;2个排沙廊道同时运行可满足电站进口“门前清”的要求;底孔坝前排沙漏斗的范围大于廊道进口漏斗,可在汛期泄洪时排沙,增大有效库容;3个漏斗在平面上有部分重叠,认为此排沙洞布置方案具备保证电站进水口“门前清”的条件。

b. 在正常蓄水位及死水位下,坝前壅水较高,此时排沙漏斗形态受排沙运行方式影响较小,漏斗

纵坡和横坡坡降均接近于淤积泥沙的水下休止角。尽管2个排沙廊道及底孔所分配流量差异很大,但所形成的漏斗坡度基本一致,因此在深水条件下,无黏性沙排沙漏斗坡度主要由淤积泥沙的水下休止角决定,受水深的影响较小。

c. 在仅考虑坝前达到淤积平衡状态、排沙洞可正常运行情况下,模型采用非黏性的天然沙或轻质沙对排沙漏斗形态及范围的模拟均偏于保守,漏斗坡度陡于实际观测值。因此,设计时可在模型试验的基础上,类比已有实测资料,酌情确定漏斗坡度以更加经济合理地布置排沙设施。

参考文献:

- [1] 洪振国. 燕子崖电站防沙和排沙设施的选择[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5):57-62. (HONG Zhengguo. Choice of sand control and desilting facilities in the Yanziya Power Station[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(5): 57-62. (in Chinese))
- [2] 郭志学,刘兴年,曹叔尤. 水库冲刷漏斗试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(5):1-5. (GUO Zhixue, LIU Xingnian, CAO Shuyou. Experimental study on reservoir scour funnel of Baoshi Water Power Station[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, 36(5): 1-5. (in Chinese))
- [3] 杨涛,黄尔,刘兴年,等. 洛古电站坝前冲刷漏斗模型试验研究[J]. 四川水力发电, 2006, 25(增刊2):68-71. (YANG Tao, HUANG Er, LIU Xingnian, et al. Experimental study on reservoir scour funnel before dam at Luogu Hydropower Station [J]. Sichuan Water Power, 2006, 25(Sup2):68-71. (in Chinese))
- [4] 徐国宾,白世录. 坝前黏性淤积物局部冲刷漏斗模拟相似性研究[J]. 水利学报, 1997, 28(11):29-34. (XU Guobin, BAI Shilu. Study on model similarity of the scour funnel for cohesive sediment downstream dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(11):29-34. (in Chinese))
- [5] 王英伟. 坝前冲刷漏斗形态的试验研究[J]. 水利水电工程设计, 2001, 20(3):42-43. (WANG Yingwei. Study on scouring hopper form in front of the dam[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2001, 20(3):42-43. (in Chinese))
- [6] 崔承章,谢鉴衡. 小浪底水库坝区冲刷漏斗形态概化模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(5):547-551. (CUI Chengzhang, XIE Jianheng. Research on a generalized model of the erosion funnel form in the dam area of Xiaolangdi Project [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1995, 28(5): 547-551. (in Chinese))

(下转第94页)