

# 水垫塘坝体型式研究进展及趋势

岳颖, 马斌, 杨敏

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 保证水垫塘防护结构自身的稳定性是实现消能防冲的关键,也是保护下游河床而采取的有效措施。当坝体高度达到或超过 300 m 时,水头高、泄洪功率大,因而产生的泄洪消能问题十分突出。近年来国内外水垫塘发生破坏的工程实例屡见不鲜,如何通过优化底板型式进而有效的改进消力塘底板整体稳定性对于枢纽整体安全至关重要。结合多个水垫塘模型试验及工程实例,分析了不同型式底板防护结构的研究内容及其进展,并提出几种有价值的新型水垫塘底板型式,为今后的研究指明了方向。

**关键词:** 水利水电工程;水垫塘;消能防冲;模型试验;防护结构;研究进展;发展趋势

**中图分类号:** TV 135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0176-05

## Research progress and trend on somatotype of plunge pool

YUE Ying, MA Bin, YANG Min

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The stability of protective structures of plunge pool is the key for the energy dissipation and erosion control, and also the effective measure to protect the downstream river bed. When the height of dam body has reached or exceeded 300m, the high head and large flood discharge power can cause the prominent problems of flood discharge and energy dissipation. In recent years, the project examples of broken plunge pool are not uncommon. How to optimize the bottom somatotype and then to improve the whole stability of plunge pool effectively is very important to the whole hub safety. Based on the model tests and project examples of plunge pool, the research content and development of different somatotypes of bottom protective structures were analyzed and several new somatotypes of plunge pool were proposed, which can be beneficial for the future research.

**Key words:** water conservancy and hydropower project; plunge pool; energy dissipation and erosion control; model test; protective structure; research progress; development trend

我国水能可开发量和已开发规模均居世界首位,一大批接近 300 m 或超过 300 m 的高坝或超高坝正在或将要建设,如溪洛渡<sup>[1]</sup>、构皮滩<sup>[2]</sup>、小湾<sup>[3,4]</sup>等,这些工程由于水头高、流量大,因此泄洪消能防护的安全问题十分突出。为了达到消能和防冲的目的,大多都将坝址下游一定距离内的河床用混凝土防护起来,并在适当位置修建二道坝,形成泄洪消能建筑物的重要组成部分——水垫塘。

高速水流及产生的缝隙流非常复杂,很容易造成许多消力塘防护结构发生破坏,因而高坝消力塘防护结构的安全问题一直是水利工程安全领域研究的热点问题,也是水电工程建设需要解决的关键技术难题之一。目前,常通过优化防护结构的型式达到增加抗失稳能力的目的,这是提高泄流结构安全的一种重要方法。基于优化设计,人们相继提出了平底

板、反拱形底板、透水底板、带键槽底板等多种防护结构型式。本文将围绕这些底板型式,分析水垫塘体型的研究现状、内容及进展,并在此基础上分析未来新型的水垫塘底板型式。

## 1 传统结构型式水垫塘

### 1.1 平底板水垫塘

平底水垫塘的底板多为矩形或梯形断面。这类底板的设计理论及实际应用相对较成熟。关于此种结构型式的研究也集中在水垫塘水流流态、脉动压力沿板间缝隙的传播规律、底板上举力的形成、底板稳定性控制指标等这些方面,研究手段既有理论研究,也有物理试验分析。

水垫塘内的水流流态可按性质分为三个不同的区域<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2014-05-22 修回日期: 2014-11-10 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1346.018.html>

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20120032120051); 国家自然科学基金青年基金项目(51309177)

作者简介: 岳颖(1989),女,天津人,主要从事水利水电工程研究。E-mail: 13821124098@163.com

(图1): I 淹没射流区;  $\dot{O}$  冲击区;  $\dot{O}$  近壁射流区。其中  $\dot{O}$  区内水流具有流速急剧减小、压力迅速增大的特点,因此对底板的破坏作用增大,即水舌入射点向下游一段的  $\dot{O}$  区是底板破坏的关键位置<sup>[6-8]</sup>,是研究的重点。

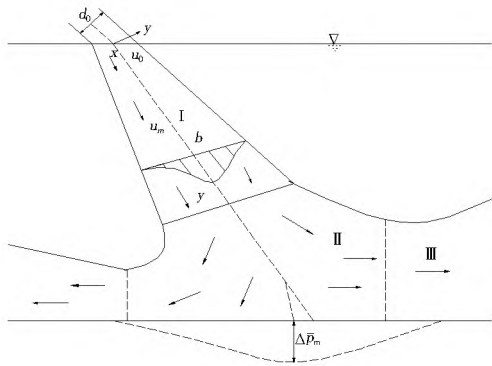


图1 淹没射流区域划分

Fig. 1 Regional division of submerged jet

底板失稳意味着水垫塘稳定性要遭受破坏,因此许多学者对平底板的底板受力、破坏机理及其稳定性进行了研究。杨敏、彭新民通过多个模型试验预测出底板所受上举力公式,对之后的相关研究具有一定的理论意义<sup>[9]</sup>;江春波等对水垫塘底板冲击压强分布特性进行了试验研究<sup>[10-11]</sup>;刘沛清等将研究重点放在底板的失稳破坏机理上,并取得了板块失稳与上举力之间的关系<sup>[12]</sup>;练继建等从板块动位移响应的角度给出了底板失稳的过程<sup>[13]</sup>。可见,上举力是导致板块失稳的重要因素,而导致上举力产生的原因是由于高速水流产生的脉动压力在板块上下表面存在着压力差,因此当动水压强沿板块缝隙传到板块下表面时,较大的脉动压力差可能导致板块失稳破坏。

由于动水压强会沿板块间的缝隙传递到板块下部,最终导致底板的破坏,所以底板或基岩缝隙的存在是导致底板破坏的另一重要因素。为了描述脉动压力沿缝隙的传播规律,人们分别提出了渗流模型、水体振荡模型、瞬变流模型<sup>[14]</sup>。李爱华等针对脉动压力在消力池底板缝隙传播的瞬变流模型和渗流模型进行探讨,认为两种模型内在是统一的,但各自的适用性不同<sup>[15]</sup>。而大多数学者认为瞬变流模型较符合真实水流情况,缝隙内的压强以波的形式传播,而水只是波的传播媒介。可事实上,脉动压力在缝隙内的传播机理是相当复杂的,目前尚无统一的定论。

我国平底板水垫塘的工程实例较多,其中的五强溪消力池和鱼塘水电站消力池在运行过程中发生了或大或小的底板破坏现象,这是板块厚度和锚固钢筋水平等因素共同作用的结果<sup>[16]</sup>。由于平底板型式的结构简单、施工方便,因此目前仍是最为常见的消力池坝体型式。但随着大型坝体的建造,常常会遇到河谷狭窄,两侧傍山的地质条件,并非适合修建平底板,因此反拱形水垫塘应运而生。

## 1.2 反拱形水垫塘

反拱形水垫塘(图2)优点在于可以根据两岸山坡走势设计剖面,使结构超载能力更强从而更加稳定。上世纪八十年代初,我国学者郭怀志等结合一中型砌石坝工程,对反拱形水垫塘进行了研究<sup>[17]</sup>。随后,在构皮滩、小湾、溪洛渡、锦屏

一级、拉西瓦等工程的试验中,均对反拱形水垫塘进行了研究<sup>[18-23]</sup>。

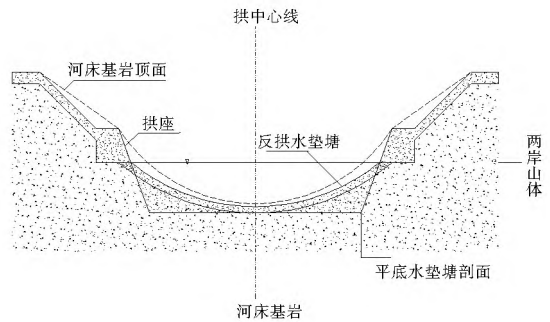


图2 反拱形水垫塘底板构造型式

Fig. 2 Structural form of counter arch slab plunge pool

对比反拱形水垫塘与平底板水垫塘可知,由于反拱形的结构能够将荷载传递给拱端,所以无论是结构稳定性还是防护能力,反拱形水垫塘都具有更为明显的优势。

对于反拱形底板,清华大学对溪洛渡反拱形水垫塘内的流动特性进行了详细的试验研究,包括与平底板相似的研究内容如脉动压力、上举力等;还重点分析了反拱形底板特有的一些结构特性,包括拱端力和对反拱底板失稳破坏机理等研究<sup>[24]</sup>。

反拱形水垫塘的失稳模式包括整体失稳和局部失稳<sup>[25-28]</sup>,无论是哪种失稳都是由于上举力超过自身的抗力导致的。比如刘沛清明确指出底板失稳破坏机理是当上举力传递给拱端时,产生了拱端推力,直接影响到拱座的稳定情况<sup>[29]</sup>;孙建通过研究给出了拱端推力的影响因素和分布情况<sup>[30]</sup>;天津大学杨敏通过实验得到最大拱端推力的经验公式<sup>[31]</sup>;练继建等给出了底板稳定的安全评价<sup>[32]</sup>。研究结果认为拱端推力强度大小决定了整个结构的稳定情况。

在反拱形底板被大量采用时,人们也意识到反拱形底板自身的缺陷:底板的材料都是采用大体积的混凝土块,会产生很大的压力差。因此要通过增加锚固水平来提高板块抗力,同时增加了经济投入。为了解决板块上下表面压力差大的问题,人们发现在底板上增设透水孔能很好地释放板块上下表面的压力<sup>[33]</sup>。试验也表明,增设透水孔后能很好的减少上举力,很好地脱离了以往的“被动防护”<sup>[34]</sup>。

## 1.3 透水底板

对于透水底板,研究较多的是底板减压卸载机理以及脉动压力沿复杂缝隙的传播规律。结果发现,当板块下表面脉动压力沿着缝隙向前传递时,遇到透水孔后脉动压力会沿着透水孔传递,使脉动压力得到释放,从而提高了防护结构的安全性<sup>[35]</sup>。近几年,天津大学通过多次试验研究了开孔率对底板水动力荷载的影响,其中杨敏结合模型试验给出了开孔前后上举力的显著变化情况<sup>[36]</sup>。究其原因,底板开孔后,由于透水孔的作用,脉动压力会较不透水底板更快地传递至整个下表面,透水底板上下表面的脉动压力相位差较不透水底板有所减小,即上下表面脉动压力同步性变好。透水孔起到了平衡底板上下表面动水压力差的作用,从而底板整体荷载较小(图3)。

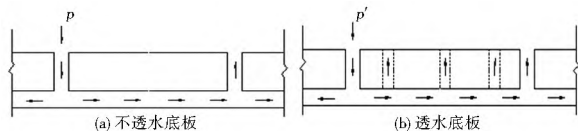


图 3 不同型式底板脉动压力传播形式

Fig. 3 Fluctuating pressure transmission of different somatotypes of plunge pool

不过,增加透水孔以后脉动压力传递规律变复杂,但目前关于透水底板下的脉动压力传播规律的研究较少,大多是基于瞬变流模型开展的一些试验研究和数值分析。

#### 1.4 带键槽底板

带键槽底板的提出具有底板型式结构创新的突破性意义。由于在工程施工时,地基往往是不均匀的,会导致底板之间出现错台现象并引起底板的不均匀沉降,因此人们从改进板块自身体型出发,设计了底板之间用键槽连接的方式(图4)。彭彬等<sup>[37]</sup>通过研究右江百色重力坝消力池结构缝键槽布置方案优化,认为键槽的设置可以明显消除由于地基的不均匀性造成的底板块不均匀沉降及错台现象。许翔等<sup>[38]</sup>分析了键槽的设置对水垫塘底板上举力的影响,结果表明增加键槽后,板块与板块间的整体性得到加强且上举力明显减小。练继建等<sup>[39]</sup>通过建立有限元模型和物理模型,验证模拟了中间板块的失稳形态,得出设置键槽可使反拱型底板的抗力提高 5%~20%,平底板的抗力提高 60%~70%。这是由于未设键槽时底板的抗力由单板块提供,而设置键槽后抗力是由该板块与其相邻的板块共同承担的。

一种新型结构的提出必然要从诸多方面研究其利与弊。以上从结构角度分析了键槽的增设对底板稳定性的一系列影响,而另一方面键槽本身的体型也会对底板稳定性产生一定影响,如变化键槽的角度等。同时还应考虑键槽的增设对水流脉动压力的传播规律的影响,从缝隙处水流脉动压力传播规律的角度分析其优势和劣势。这些问题均需要将来进行大量的研究工作。

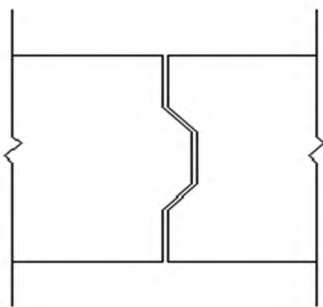


图 4 键槽结构型式

Fig. 4 Structural form of keyway

## 2 新型结构型式的研究趋势

随着我国今后在西南等地继续大规模开发水电,高水头大功率泄洪消能问题仍是关键课题。上文提到的几种水垫塘体型,已在拉西瓦、百色、索风营等工程中得到应用,但目前对水垫塘防护结构安全性的研究水平还不能满足日益增长的工程需要,所以本文提出几种新型的水垫塘防护结构,

可作为今后实践研究的重要课题。

### 2.1 异形构造水垫塘底板

异形构造底板即在板块之间设置键槽,并在底板上设置一定开孔率的透水孔,底板与边坡的部位考虑部分反拱型式(图5)。这种构造型式可综合透水底板、带键槽底板及反拱底板的优势,可有效改善消力塘的整体稳定性。针对该型式底板,今后可以开展消力塘水动力荷载特性及稳定性、高速水流沿复杂缝隙的传播规律,揭示该底板型式的失稳机理及破坏模式,为水利工程的优化设计或者运行提供量化的指标和科学的理论依据,对于大、中型水电工程预防及避免破坏发生都具有非常重要的理论价值和现实意义。

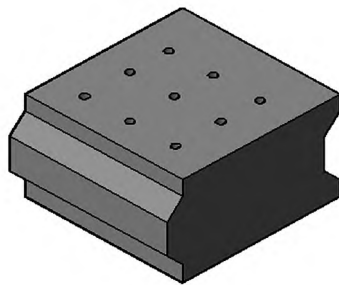


图 5 异形构造底板结构型式

Fig. 5 Structural form of special-shaped plunge pool

### 2.2 部分混凝土衬砌水垫塘

我国在西南等地区修建了一批 300 m 级高的拱坝,泄洪消能和防冲任务十分艰巨。对水垫塘底板进行全混凝土衬砌,可以有效解决坝下冲刷问题,但造价较高,一般约占坝体造价的 10%。国外已有一些工程采用不衬砌水垫塘,虽然泄洪功率较小,但仍有借鉴意义,如土耳其、南非等。有学者研究表明根据泄洪工况底板所承受的上举力和冲击动水压强情况,在坝脚有抗淘刷混凝土保护的情况下,减薄或取消水舌入水点上游侧的混凝土衬砌是可能的,而且在水垫塘前部局部取消混凝土衬砌能有效降低水垫塘底板的渗透压力,对检修工况特别有利<sup>[40]</sup>。综合水垫塘建设的经济投入和结构型式的合理设计,可以考虑采用部分混凝土衬砌结构水垫塘底板。

### 2.3 圆弧底反拱水垫塘

目前,已建成的高拱坝工程,水垫塘体型大都为平底梯形断面,有学者通过对平底型、反拱圆弧型、反拱抛物线型三种不同的水垫塘体型在不同方面进行了对比分析,认为反拱圆弧型水垫塘结构为最优。由于此结构还未得到广泛研究,也未在工程中得到证实和应用,所以仍可作为以后学者讨论的课题。

## 3 结语

本文总结了前人对于水垫塘底板体型结构及其对结构整体安全性影响的一系列研究,成果可供参考借鉴,但有一些理论还不成熟,也没有得到广泛应用,这需要后人继续深入研究。我国西部大规模地开发水电,在泄洪消能这一问题上,更需要后者站在前人的肩膀上继续发现问题、认识问题、解决问题,特别是对于文中提出的几种新型水垫塘结构,有

待进一步研究和分析,最终为大型坝体水垫塘型式的选择提供帮助和借鉴。

#### 参考文献(References):

- [1] 肖白云. 溪洛渡水电站高拱坝大流量泄洪消能技术研究[J]. 水力发电, 2001(8): 69-71. (XIAO Baiyun. Research on the flood discharge and energy dissipation with large flow in Xiluodu power station [J]. Water Power, 2001(8): 69-71. (in Chinese))
- [2] 程子兵, 韩继斌, 黄国兵. 构皮滩水电站泄洪消能试验研究[J]. 人民长江, 2006, 37(3): 84-86. (CHENG Zhibing, HAN Jibin, HUANG Guobing. Experimental investigation on flood discharge and energy dissipation in Goupitan power station [J]. Yangtze River, 2006, 37(3): 84-86. (in Chinese))
- [3] 陈捷, 周胜, 孙双科. 小湾水电站坝身泄洪消能布置优化研究[J]. 水力发电, 2001(10): 38-42. (CHEN Jie, ZHOU Sheng, SUN Shuangke. Investigation on the optimization of flood discharge and energy dissipation of dam of Xiaowan power station [J]. Water Power, 2001(10): 38-42. (in Chinese))
- [4] 杨永全. 小湾水垫塘水力特性及设计优化研究[J]. 云南水力发电, 1998(4): 56-59. (YANG Yongquan. The water cushion pond hydraulic characteristics and design optimization [J]. Yunnan Hydroelectric Power, 1998(4): 56-59. (in Chinese))
- [5] 刘沛清, 高季章, 李永梅. 高坝下游水垫塘内淹没冲击射流实验[J]. 中国科学, 1998, 28(4): 370-371. (LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Yongmei. Submerged impinging jet in water cushion pool downstream the dam [J]. Science in China Press, 1998, 28(4): 370-371. (in Chinese))
- [6] 杨敏, 孙勉. 水垫塘透水底板上举力实验研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 88-90. (YANG Min, SUN Mian. Experimental study on the water cushion pond on the pervious slab uplifts [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 88-90. (in Chinese))
- [7] 张建民, 杨永全, 戴光清. 高拱坝挑跌流泄洪消能水垫塘底板稳定性研究[J]. 四川大学学报, 2000, 32(2): 17-20. (ZHANG Jianmin, YANG Yongquan, DAI Guangqing. Study on the stability of high arch dam or the water cushion pool drainage flood energy dissipation [J]. Journal of Sichuan University, 2000, 32(2): 17-20. (in Chinese))
- [8] 崔莉, 张廷芳. 射流冲击下护坦板块失稳机理的随机分析[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 7(2): 212-218. (CUI Li, ZHANG Tingfang. Analysis of random impingement jet instability mechanism of the apron plate [J]. Research and Development of Water Dynamics, 1996, 7(2): 212-218. (in Chinese))
- [9] 杨敏, 彭新民. 高坝水垫塘底板上举力特性与预测方法[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 29-31. (YANG Min, PENG Xinmin. Dam water cushions bottom uplift characteristics and prediction method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(9): 29-31. (in Chinese))
- [10] 江春波, 王英奎, 张世彦. 水垫塘底板冲击压强分布特性试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(12): 2123-2126. (JIANG Chunbo, WANG Yingkui, ZHANG Shiyen. Experimental study of the impact pressure distributions in a stilling basin during flood discharges [J]. Tsinghua University (Univ & Tech), 2007, 47(12): 2123-2126. (in Chinese))
- [11] 江春波, 杨泽川. 水垫塘底板冲击压强和流速分布研究[J]. 水力发电, 2005, 31(12): 28-30. (JIANG Chunbo, YANG Zechuan. Investigation of impact pressure and velocity distribution on the stilling basin [J]. Water Power, 2005, 31(12): 28-30. (in Chinese))
- [12] 刘沛清. 高拱坝下游水垫塘底板块稳定性设计[J]. 水利学报, 1999(2): 5-12. (LIU Peiqing. High arch dam downstream water cushion bottom plate stability design [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(2): 5-12. (in Chinese))
- [13] 练继建, 杨弘, 李福田. 水垫塘底板稳定性的动位移响应识别方法研究[J]. 水利学报, 2007, 6, 38(6): 717-723. (LIAN Jijian, YANG Hong, LI Futian. The stability of plunge pool slabs of dynamic displacement response identification method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 6, 38(6): 717-723. (in Chinese))
- [14] Fiorotto V, Rinaldo A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps [J]. J. Hydr. Res., IAHR, 1992, 30(4).
- [15] 李爱华, 刘沛清. 脉动压力在消力池底板缝隙传播的瞬变流模型和渗流模型统一性探讨[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1236-1239. (LI Aihua, LIU Peiqing. The fluctuating pressure in stilling crack propagation of transients on model and seepage flow model unity flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1236-1239. (in Chinese))
- [16] 王继敏. 高坝消力塘防护结构安全问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (WANG Jimin. Research on the security of the power pool protecting structure in high dam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [17] 郭怀志. 溢流坝下反拱式消力池试验研究与工程设计[J]. 海河水利, 1980(7). (GUO Huaizhi et al. Study on the anti arch eliminating stress test and engineering design of spillway dam under pool [J]. Haihe River Water Conservancy, 1980(7). (in Chinese))
- [18] 韩继斌, 袁玲玲, 肖兴斌. 从高拱坝的工程实践看构皮滩泄洪消能设计的可行性[J]. 长江科学学院学报, 1997, 14(1): 7-11. (HAN Jibin, YUAN Lingling, XIAO Xingbin. Look at the design of eliminating the feasibility to release flood waters from the practice of Goupitan high arch dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997, 14(1): 7-11. (in Chinese))
- [19] 谢思思. 小湾水电站水垫塘结构型的分析研究[J]. 云南水力发电, 2002, 18(3): 39-41. (XIE Sisi. Analysis of water cushion pool structure of Xiaowan hydropower [J]. Yunnan Water Power, 2002, 18(3): 39-41. (in Chinese))
- [20] 黄庆, 雷军, 陈亚琴. 溪洛渡水电站水垫塘断面型式研究[J]. 水电站设计, 2011, 27(4): 26-30. (HUANG Qing, LEI Jun, CHEN Yaqin. Study on station section type water cushion pond of Xiluodu hydropower [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2011, 27(4): 26-30. (in Chinese))
- [21] 黎满林, 宋玲丽. 锦屏一级水电站消能防冲设计[J]. 水电站设计, 2010, 26(3): 17-20. (LI Manlin, SONG Lingli. Jinping first stage hydropower station design of energy dissipation and erosion control [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2010, 26(3): 17-20. (in Chinese))
- [22] 黄岩松, 周维垣, 杨若琼, 等. 拉西瓦拱坝稳定性分析和评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 901-905. (HUANG

- Yan song, ZHOU Wei yuan, YANG Ru o qiong et al. Stability analysis and evaluation of Laxiwa arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (5): 901-905. (in Chinese)
- [23] 陈亮, 卢亮, 张莹. 反拱形水垫塘结构在拉西瓦水电站上的研究与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 196-199. (CHENG Liang, LU Liang, ZHANG Ying. Study and Application of Reverse Arch Water Cushion Pond in Laxiwa Hydropower Station [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 196-199. (in Chinese))
- [24] 孙建, 张春财等. 溪洛渡高拱坝反拱水垫塘与平底水垫塘流场的三维数值模拟比较[J]. 四川大学学报, 2009(5): 8-16. (SUN Jian, ZHANG Chun cai, et al. Comparison of three dimensional numerical Xiluodu high arch dam anti arch water cushion and a water cushion flow field simulation [J]. Journal of Sichuan University, 2009(5): 8-16. (in Chinese))
- [25] 孙建, 陈长植. 反拱水垫塘与平底水垫塘底板稳定性诸方面的比较 [J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 3-6. (SUN Jian, CHEN Chang zhi. Comparison of aspects on stability of arch invert water cushion pool with those of flat bottom one [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(4): 3-6. (in Chinese))
- [26] 彭新民, 王继敏, 崔广涛. 拱坝水垫塘拱形底板受力与稳定性试验研究 [J]. 水力发电学报, 1999(2): 52-59. (PENG Xin min, WANG Ji min, CUI Guang tao. A study on the stability of arch slab in plunge pool of arch dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(2): 52-59. (in Chinese))
- [27] 练继建, 杨敏, 安刚, 等. 反拱型水垫塘底板结构的稳定性研究 [J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 24-27. (LIAN Ji jian, YANG Min, AN Gang, et al. Study on stability of counter arch slab plunge pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(12): 24-27. (in Chinese))
- [28] 张春财. 反拱水垫塘的数值模拟及其底板振动特性的试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (ZHANG Chun cai. Simulation on flow field of inverted arch cushion pool and experimental study on vibration characteristics of slabs [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [29] 刘沛清, 冬俊瑞, 余常昭. 在岩缝中脉动压力传播机理探讨 [J]. 水利学报. 1994, 12: 31-36. (LIU Pei qing, DONG Jun rui, YU Chang zhao. Study on crack propagation mechanism of pulsating pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 12: 31-36. (in Chinese))
- [30] 孙建, 陈长植. 反拱水垫塘拱端力变化规律的试验研究 [J]. 水力发电学报, 2002, 4: 51-60. (SUN Jian, CHENG Chang zhi. Experimental study on anti arch water cushion arch changes end force [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 4: 51-60. (in Chinese))
- [31] 杨敏, 练继建. 水垫塘反拱型底板体型研究 [J]. 水力发电学报, 2002, 4: 45-50. (YANG Min, LIAN Ji jian. Research on the body type plate counter arch plunge pool [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 4: 45-50. (in Chinese))
- [32] 练继建, 刘喜珠, 马斌. 水垫塘反拱底板静动力耦合分析及安全评价 [J]. 中国科学, 2009, 39(4): 763-777. (LIAN Ji jian, LIU Xi zhu, MA Bin. Water cushion pool of invert arch static dynamic coupling analysis and safety evaluation [J]. Science in China Press, 2009, 39(4): 763-777. (in Chinese))
- [33] 哈焕文. 透水护坦上动水荷载及其脉动的研究 [J]. 水利学报, 1964(4): 14-26. (HA Huan wen. Study on the hydrodynamic load and pulsation of the permeable apron [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(4): 14-26. (in Chinese))
- [34] 张少济, 杨敏. 消力塘透水底板脉动压力特性试验研究 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 85-94. (ZHANG Shao ji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a plunge pool [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 85-94. (in Chinese))
- [35] 张少济. 消力塘透水底板减压降载机理研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008. (ZHANG Shao ji. Study on decompression mechanism of the pervious slabs in plunge pool [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [36] 杨敏, 董天松. 高坝消力塘防护结构稳定性研究进展 [J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2010, 11(3): 77-81. (YANG Min, DONG Tiansong. Research Progress on the stability of high dam of protective structure [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition. 2010, 11(3): 77-81. (in Chinese))
- [37] 彭彬, 张建海, 蒙承刚, 等. 右江百色重力坝消力池结构缝键槽布置方案优化研究 [J]. 四川大学学报, 2004, 36(1): 19-23. (PENG Bin, ZHANG Jian hai, MENG Cheng gang et al. Youjiang Baise dam stilling pool structure joints of the optimal layout scheme of the keyway [J]. Journal of Sichuan University, 2004, 36(1): 19-23. (in Chinese))
- [38] 许翔, 杨敏. 水垫塘板块结构特性对底板稳定的影响分析 [D]. 天津: 天津大学, 2012. (XU Xiang, YANG Min. Analysis of the structure characteristics of water cushion pond bottom plate of stable [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [39] 马斌, 练继建, 刘喜珠. 带键槽消力塘底板的安全性分析 [J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 66-68. (MA Bin, LIAN Ji jian, LIU Xi zhu. Analysis of safety with keyway stilling pond bottom [J]. Water resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 66-68. (in Chinese))
- [40] 王常让, 周述椿, 周勇. 水垫塘结构形式问题探讨 [J]. 水力发电, 2010, 36(10): 31-32. (WANG Chang rang, ZHOU Shu chun, ZHOU Yong. To investigate the water cushion pool structure form [J]. Water Power, 2010, 36(10): 31-32. (in Chinese))