

收缩式消能工的研究现状及进展

黄秋君 吴建华

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了总结新型组合式消能工在高坝建设发展中的可利用性及重要性,综述了收缩式消能工与其他消能工联合运用的结构、原理和工程应用。收缩式消能工由于其水流占用宽度较小等特点,与其他消能工联合运用可以解决许多在深狭河谷中修建水利枢纽的泄洪问题。根据不同工程自身的特点,应设计和选用不同的组合式消能方式。

关键词:收缩式消能工;联合消能工;宽尾墩;窄缝式

中图分类号:TV653 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2008)02-0219-05

近年来,越来越多的高坝建设于深山峡谷中,这些高坝具有水头高、流量大的特点,因此传统的消能方式很难满足泄洪消能要求。经过水利工作者的努力,一些新型的消能方式及联合消能工得到了广泛应用。收缩式消能工就是其中一种重要的消能方式,它与其他消能方式联合运用,解决了许多坝身泄洪问题。

收缩式消能工是以射流纵向扩散为基础的新型消能工形式。急流通过收缩边壁时表面形成驻波,使底部法线上各质点的速度具有不同倾角,愈接近自由表面倾角愈大。水流出收缩段时,由于底部法线上各质点以不同的方向在立面中运动,射流在立面中扩展,产生纵向扩散。这种扩散主要依靠各质点纵向流速流向的改变。由于流速的纵向值一般远大于横向值,故利用纵向流速的扩散远比横向扩散充分^[1]。由于收缩式消能方式水流占用宽度较小,特别适应于我国西南地区河谷狭窄、洪水峰高量大的情况。收缩式消能工主要有宽尾墩消能工和窄缝式消能工 2 种形式。本文综述了收缩式消能工与其他消能工联合运用的结构、原理及在实际工程中的应用。

1 宽尾墩与其他消能工的联合运用

宽尾墩消能工是由我国学者林秉南院士和龚振瀛在 20 世纪 70 年代提出的,是收缩式消能工在我国的创造性发展,在我国坝工消能方面产生了相当重要的影响。在与其他消能措施的联合消能中,宽尾墩是一种附加消能措施,由于它的参与,改变了原有的消能机理及消能过程。

1.1 宽尾墩-消力池联合消能工

当宽尾墩和消力池联合运用时,原来平尾墩时堰顶的溢流水舌(二元流态)在闸墩尾部宽度被骤然收缩,迫使水流沿坝面竖向扩展而成为窄而高的收缩射流(堰顶收缩射流)。在沿坝面下泄时,由于受到重力的影响,水舌又逐渐坦化向无水区扩展,并趋向于恢复原来的二元流态。当水舌坦化进入反弧段时,相邻两孔水股开始交汇,各股水流在消力池水垫内相互混合,产生强烈的动量交换和紊动剪切。当下游为急流时,在反弧段和消力池前部,会激起很高的涌浪;当下游有足够的水深时,则产生三元水跃^[2]。安康水电站^[3-4]表孔溢流坝段就是采用宽尾墩-消力池联合消能工形式(图 1)。

随着表孔消力池采用宽尾墩的技术突破,安康水电站采用了不对称宽尾墩(1 号孔)加差动式折流墩(2、3 孔)和消力池的联合消能工方案,在池长仅

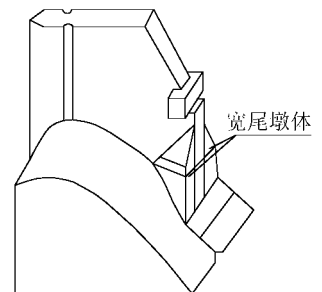


图 1 表孔溢流坝段宽尾墩体

Fig.1 Flaring piers of surface hole overflow dam

约为常规消力池池长 $1/2$ 的条件下,形成了较完整的水跃,较为圆满地解决了河床 3 个中孔的消能防冲问题(图 2)。

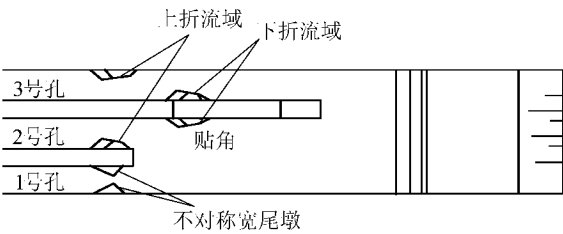


图 2 中孔溢流坝段宽尾墩体型示意图

Fig.2 Flaring piers of mesopore overflow dam

试验表明,安康水电站表孔和中孔溢流坝消力池由于采用了宽尾墩,消力池的长度分别缩短了 $1/3$ 和 $1/2$,消力池底板减薄 2 m,节省工程造价约 1 173 万元,同时还简化了围堰下游的防护工程,加速了施工进度,保证了提前发电。

1.2 宽尾墩-底孔(挑流)-消力池联合消能工

宽尾墩-底孔(挑流)-消力池联合消能工的主要思路是利用宽尾墩后的无水区来布置坝身泄洪底孔的出口。底孔的水流以挑流的方式注入宽尾墩消力池的三元水跃中进行联合消能。因此,当底孔关闭,其水流特性即为一般的宽尾墩消力池联合消能工。关键问题是当底孔打开,水流以挑流方式注入水跃后,是否会恶化消力池的水跃消能。文献[5]以二元附加动量水跃为模式,对新型联合消能工的底孔射流注入水跃的水力条件进行分析,结果表明用附加动量降低第二共轭水深、增进水跃消能只有在水跃顶部注入射流才是可行的。当由顶部注入射流,只要适当控制射流的入射角,就可在增加消力池单宽流量的条件下保持或增进原水跃的消能效果,这是采用宽尾墩-底孔(挑流)-消力池联合消能工的水力学依据。

五强溪水电站坝址洪水峰高量大,河床狭窄,地质条件复杂,其泄洪消能问题是工程建设的主要技术问题之一。工程采用表孔宽尾墩-底孔(挑流)-消力池相结合的新型联合消能工,利用宽尾墩的位置加设底孔,底孔挑射水流进入消力池。由于动能附加质量的原理,增加了消能效果,这是国内首创,在国外也没有先例。五强溪表孔消力池采用该联合消能工形式后,其直接节约投资约 4 000 万元^[6]。

研究表明,表孔宽尾墩-底孔(挑流)-消力池相结合的新型联合消能工的消能效果十分显著,池内水跃完整,旋涡破碎,掺气剧增,余能较小,完全达到了预期效果。

1.3 宽尾墩-挑流联合消能工

宽尾墩-挑流联合消能工利用宽尾墩先收缩后扩散的流动特性,使鼻坎上水流自然分层形成差动,造成连续鼻坎具有差动鼻坎的特征。因为水冠而大量掺气,也增加了消能效果。由于坝面收缩射流在纵向充分扩散,因而与之联合运用的挑流鼻坎的反弧半径也需要相应的加大,这样才能发挥更好的效果。

在多孔泄流的溢流坝上,当坝面上窄而厚的掺气射流到达反弧段时,在强大的侧向压力梯度作用下,将向两侧迅速扩散。相邻两孔之间的横向扩散水舌互相顶撞,激起高高的“水冠”,在坎端形成高低相间的水股挑出,其流态与差动鼻坎挑流相似。横向水舌在反弧段上碰撞顶托,一方面增加扰动并消耗了部分能量,另一方面水冠的形成也会使射流的上下缘挑距拉开,使之在纵向再次得到扩散和掺气。最后射流跌入上游水面时,单位面积的能量减少,降低了对河床的冲刷能力^[7]。

当开启一孔时,水舌在反弧段上的横向扩散将远大于一般措施所能达到的程度。因此,即使在间隔多孔开启的情况下,反弧段上的横向水舌也能互相撞击,激起水冠。

潘家口水库^[8]采用此种消能工形式,收到了较好的效果,如图 3 所示。潘家口水库是华北滦河干流上的一个大型水利枢纽,该水库的泄水建筑物包括 18 个表孔(左 11 个,右 7 个)和 4 个泄水深孔。由于潘家口水库是国内在大型工程中首次尝试采用宽

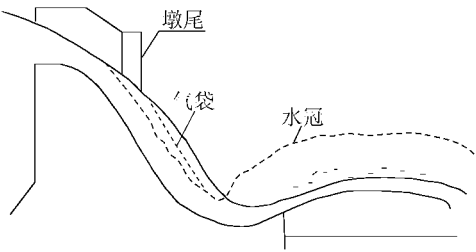


图 3 潘家口宽尾墩-挑流联合消能工溢流坝面流态

Fig.3 Flow state on dam face of Panjiakou overflow dam flaring piers incorporating bucket dissipator

尾墩,对它的消能效果有一个认识过程,因而只在右边7孔中最靠右的3个表孔采用宽尾墩。即使如此,水工模型试验表明,宽尾墩的应用仍比平尾墩时减少了水流对右岸的冲刷及左岸的回流。

1.4 宽尾墩-库式消力池联合消能工

宽尾墩-库式消力池的消能特点、机理与一般宽尾墩消力池联合消能工的消能机理没有本质的不同,都是利用宽尾墩本身在堰顶产生的多股收缩射流的水体在库池内反弧段坦化、交汇和混合来极大地加强水流内部的紊动剪切和掺混作用,使过堰水流内部更多动能转换为热能和势能,从而使宽尾墩-库式消力池内的二元库流(不完全水跃)变为稳定的完全的三元水跃^[9],大大提高平尾墩-库式消力池的消能效果。

岩滩水电站采用该宽尾墩-加库式消力池联合消能的方式,通过水工模型试验证实,消能效果很好,主要体现在:(a)增加库底水深,加大库底压力,提高消力库自身的稳定性,从而可减少基础锚杆工程量;(b)降低库底、库坎流速,削减水流动量,减轻水及泥沙对库面的磨损破坏;(c)大量地削减浪高;(d)削弱厂房尾水区回流及波动,削弱两岸回流及冲刷;(e)增加溢流堰面、堰顶闸门门槽、消力库库坎等处动水压力,避免气蚀破坏^[10-11]。

1.5 宽尾墩-阶梯式溢流坝联合消能工

把宽尾墩的消能技术应用于碾压混凝土溢流坝,形成了宽尾墩和阶梯式溢流面相结合的联合消能方式。这种新的消能方式兼有宽尾墩消能和阶梯式溢流面效能的特点和优点:既利用阶梯式溢流面进一步增进了宽尾墩的消能率,又利用宽尾墩后的无水区对阶梯底部进行通气来避免空化和空蚀,从而使阶梯式溢流坝向高水头大单宽流量方面发展,这是碾压式混凝土溢流坝和常态混凝土溢流坝消能技术的突破。

大朝山水电站在坝高超过100m,单宽泄量近 $200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}/\text{m}$ 的条件下采用了宽尾墩-阶梯式溢流坝联合消能工,这是国内首次采用这种消能形式,并取得初步的原始资料,为这一技术的推广应用打下了良好的基础^[12]。

水东水电站采用了宽尾墩-阶梯式坝面-库池的联合消能工形式。它在1994年5月1~3日经历了近百年一遇的洪水考验,对洪水过程进行的录像未观测到大坝任何异常现象,新型消能工消能效果令人满意。洪水过后,首先对正常水位以上的溢流面和消力库池边墙,尤其是阶梯溢流面进行了详细的检查,边墙完好无损,溢流面仅墩后泄流出口处的阶梯面勾缝出现局部损坏现象,墩末勾缝局部损坏越往下越小,至水面以上若干台阶范围内勾缝完整无缺。经分析认为,这是由于宽尾墩使水体纵向拉开,底部水流出墩后在阶梯面上急剧向两侧扩散,能量也随之消散,因此对闸室后阶梯面的冲刷呈衰减趋势。当水体继续往下部推进时,在重力作用下,流速有所增加,但由于墩后阶梯面的补气和水垫作用,常水位以下阶梯面的冲刷不会产生明显的恶化^[13]。

宽尾墩联合消能工是我国首创的一项泄洪消能新技术。经过近30年的研究和开发,已在我国得到进一步的发展。一批宽尾墩和常规的挑流、底流、面流、坝面消能联合运行的新型消能工的出现,标志着我国的高坝泄洪消能技术已走在世界前列。

2 窄缝式消能工与其他消能工的联合运用

根据资料^[14-15]介绍:早在1954年葡萄牙首先在卡勃利尔(Cabril)枢纽中的泄洪洞出口末端采用窄缝式消能工,继后在卡斯特罗多博德(Castalo do Bale)坝面滑雪道采用。20世纪60~70年代,西班牙的许多工程以及法国、伊朗和南斯拉夫也采用过这种形式。从20世纪70年代末开始,我国也在一些拟建工程对窄缝式消能工进行了试验研究。我国先后采用窄缝挑坎消能工的工程有东江、龙羊峡、东风、李家峡、天生桥一级、隔河岩、漫湾以及水布垭等大型水电站泄洪建筑物,经泄洪运行,工作状态良好^[16-17]。

窄缝挑坎消能工利用侧墙的收缩使两侧水流碰撞,改变水流质点间的相互作用和水流结构,加剧了水流的紊动,利用掺气和空气阻力作用,消杀部分能量后水流被抛射至下游河床与尾水衔接。窄缝挑坎消能工既是消能结构,又可改变射程方向,使水流与下游河床主流一致,大大提高消能效果^[18]。研究分析认为,窄缝挑坎消能工总消耗能量主要由紊动消能、水流碰撞消能、掺气与空气阻力消能及水垫消能等4部分组成^[19]。

窄缝挑坎消能工有许多优点,但并不是在任何条件下都适用,如果选择不当,造成下游的冲刷可能性更大。在急流条件下,当收缩角度选取适宜时,由于来流的弗劳德数 Fr 及收缩比不同,在挑坎上的水流可能出现4种不同的流态(图4)^[20]:(a)在挑坎内出现水跃;(b)挑射水流纵向扩散不良,当收缩稍微减小,流态即变

差(c)纵向扩散较好(d)当 Fr 再增大时,挑坎上即产生严重的冲击波.由图4可以看出,当选定收缩比后,窄缝挑坎的适用条件是 $Fr = 4.5 \sim 10.0$,当水流 $Fr = 3.0 \sim 4.5$ 时,窄缝挑坎上的流态和 Fr 之间的关系非常敏感,需要仔细研究和足够的论证才可使用.

窄缝挑坎一般设置在溢洪道末端或底孔出口.落差较大的溢洪道通常先缓慢缩窄,最后在末端急剧收缩形成窄缝.出口断面有窄矩形、窄梯形等.为使收缩射流顺应河道流向,挑坎出口在平面上常作相应的转折或扭曲^[7].

2.1 窄缝挑坎-扩散挑坎联合消能工

窄缝挑坎-扩散挑坎联合消能工的显著特点是将窄缝挑坎与经典的扩散挑坎有机结合,立体消能,充分利用了窄缝挑坎的高效消能和对水舌的灵活导向,将水舌的纵向拉开、横向扩散、差动特性融为一体,因地制宜,机动灵活地发挥各种水舌的特性^[21].在相同条件下,与连续式挑坎相比,窄缝挑坎-扩散挑坎联合消能工将相同的入水流量分成两部分下泄,扩散挑坎的出坎水舌在空中横向充分扩散,入水水舌占满整个河床横断面,大幅度减小对下游河床的冲刷,窄缝挑坎的出坎水舌则是通过侧墙的收缩迫使其在竖向和纵向充分扩散、掺气,且顺水流方向充分散开,消杀能量.窄缝挑坎-扩散挑坎联合消能工不仅从纵向扩展了消能区,而且使横向入水的单宽流量减小50%以上,因此总体消能效果明显.卡房水库采用这种联合消能工形式^[22],通过“一收一扩(挑坎),一纵一横(水舌)”的巧妙组合,使消能、导向和灵活运用实现了有机的统一.

2.2 窄缝-低坝库式消力池联合消能

把高坝收缩射流消能工引申到低坝库式消力池上,主要是依靠作用在消能工底板水头上的差异,窄缝的槽孔宽度比、收缩比、槽宽槽深比、坎高槽深比和收缩角等要素的综合作用,使分别通过顶部消力库与底部窄缝的流量,先是“各行其道”,然后进行相互掺混、碰撞、剪切,发挥消能作用.

低坝底板厚度大,为设置窄缝提供了有利条件,设置窄缝也是节省工程量的措施.依据水流特点分析,库底设窄缝既为顶部消力库分流,又可以实现空间水流消能.桥巩水电站^[23]采用这种库池底部加窄缝的联合消能工形式,结构简单,将低坝二元库流消能转变为三维空间消能,消除二元库流“三滚一浪”对工程产生负面影响,同时借助结构特点及水力作用,使消力库具有自我清理推移质的能力.

3 结 语

本文对收缩式消能工与其他消能工联合消能的应用和发展进行了分析和总结,阐明了随着我国高坝建设的不断创新和发展,新型的组合式消能工已经表现出了显著的优越性.收缩式消能工亦可考虑用于中、低坝中,综合总体布置有可能获得良好的空间扩散效果,值得进一步研究.

参考文献:

- [1] 张春满.高坝新型消能工的应用[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2005,5(2):1-3.
- [2] 谢省宗,李世琴,李桂芬,等.宽尾墩联合消能工在我国的发展[J].红水河,1995,14(3):3-11.
- [3] 于忠政,刘永川,谢省宗,等.安康水电站泄洪消能新技术的研究与应用[J].水力发电,1990(11):32-36.
- [4] 谢省宗,林秉南.宽尾墩消力池联合消能工的消能机理及其水力计算方法[C]//泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994.
- [5] 谢省宗,李世琴,李桂芬,等.宽尾墩联合消能工在我国的发展(续I)[J].红水河,1996,15(1):24-31.
- [6] 李士一,陈其煌.新型联合消能工在五强溪水电站的应用[C]//水利水电科学研究院.高坝泄洪与消能专题文集.北京:水利电力出版社,1989.
- [7] 龚振瀛,刘树坤,高季章.宽尾墩和窄缝挑坎-收缩式消能工的应用[J].水力发电学报,1983(3):48-57.
- [8] 李成乾,曹楚生.潘家口水利枢纽的设计经验[J].海河水利,1994(4):10-13.
- [9] 谢省宗,朱荣林.宽尾墩库斗消力池联合消能工的水力特性及其水力计算方法[J].水利学报,1992(2):7-18.
- [10] 荣权华,徐木运.岩滩水电站宽尾墩新型消能工的试验研究[J].红水河,1996,15(2):4-7.

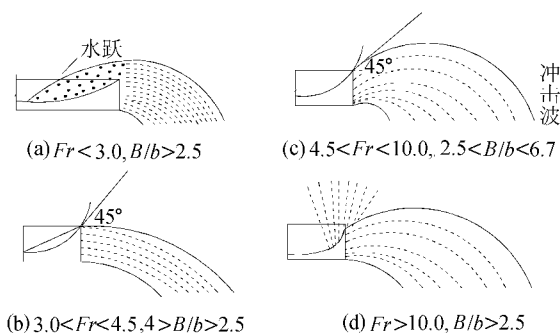


图4 不同 Fr 挑坎上的流态

Fig.4 Flow pattern of bucket with varying Fr

[11] 吴胜光.岩滩水电站宽尾墩戽式消力池联合消能效果[J].红水河 ,1998 ,17(2) :28-31.

[12] 林可冀,韩立,邓毅国.大朝山水电站 RCC 溢流坝宽尾墩、台阶式坝面联合消能工的试验研究及应用[J].水利水电勘测设计 ,2003(1) :1-14.

[13] 何光同,曾宪康,李祖发,等.水东水电站新型消能工结构优化设计[J].水力发电 ,1994(9) :26-28.

[14] 周石权.浅谈窄缝式消能工在泄水建筑物中的应用[J].人民长江 ,1989(1) :9-17.

[15] 肖兴斌.窄缝式消能工在高坝消能中的应用与发展综述[J].水电站设计 ,2004 ,20(3) :36-41.

[16] 许百立.中国的坝工建设[J].水利水电科技进展 ,1999 ,19(5) :2-6.

[17] 王治祥.窄缝式挑坎强化消能与体型问题研究[J].红水河 ,1994 ,13(2) :24-31.

[18] 王治祥.窄缝式挑流消能工的消能机理与消能特性初步分析[C]//泄水工程与高速水流论文集.成都 :成都科技大学出版社 ,1992.

[19] 高季章,李桂芬.窄缝式消能工在泄水建筑物中应用条件的初步研究[J].水利水电技术 ,1984(10) :1-6.

[20] 南晓红,聂源宏,梁宗祥,等.窄缝式消能工在重力拱坝坝面溢流中的应用[J].中国农村水利水电 ,2004(6) :54-56.

[21] 南晓红,徐自立,梁宗祥.卡房水库坝面溢流泄洪消能问题的试验研究[J].西北水资源与水工程 ,2000 ,11(3) :46-49.

[22] 陈忠儒,陈义东.窄缝式消能工的水力特性及其体型研究[J].水利水电科技进展 ,2003 ,23(2) :25-29.

[23] 罗秉珠,陈龙,吴小斌,等.“ 戽底设窄缝混合消能 ”在桥巩水电站低坝中的应用[J].红水河 ,2005 ,24(2) :1-4.

Research on contraction energy dissipators

HUANG Qiu-jun , WU Jian-hua

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The availability and importance of new combined types of energy dissipators in the construction of high dams were studied. The structures , principles and applications of contraction energy dissipators combined with other energy dissipators were reviewed. Due to the contraction characteristics of contraction energy dissipators , the combined energy dissipators can be used in flood discharge of hydropower projects constructed in deep and narrow stream valleys. It is crucial to design and use different combined types of energy dissipators according to different characteristics of projects.

Key words : contraction energy dissipator ; combined energy dissipator ; flaring pier ; slit-type