

高重力坝挑坎体型及水力特性对比

马 斌,王宇航,缙文娟,叶星宇,杜 涛

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:基于水工模型试验方法,利用几何比尺为60的黄河古贤水利枢纽水工模型,研究了连续式、窄缝式、差动式、燕尾式、直边窄缝燕尾式及曲面窄缝燕尾式共6种体型挑坎的水舌特性及水垫塘底板的压强特性。结果表明:连续式挑坎水舌呈连续且集中的形态;当挑角为30°时,窄缝式挑坎并未呈现纵向拉伸的水舌形态,内外缘挑距大,入水宽度小,冲击压强与脉动强度较大;差动式挑坎水舌呈现分层分股的形态特征,入水宽度变大,冲击压强与脉动强度减小;燕尾式挑坎水舌纵向呈扫帚状,水舌面积增大,在空中扩散、掺气、摩擦消散充分,入水宽度大大增加,沿程时均压强未出现冲击压强且脉动强度最大值比连续式、窄缝式及差动式挑坎分别降低59.5%、69.8%和39.4%;曲面窄缝燕尾式挑坎横向收缩与纵向拉伸效果比直边窄缝燕尾式挑坎好,且横向收缩有利于近坝区水体紊动及削弱二道坝区水体紊动;燕尾式挑坎有利于水垫塘底板稳定和下游消能防冲,对于类似高重力坝挑坎体型选择具有一定参考价值。

关键词:重力坝;挑流消能;挑坎体型;水舌特性;时均压强;脉动压强

中图分类号:TV653+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0071-07

Comparison of flip bucket shapes and hydraulic characteristics of a high gravity dam//MA Bin, WANG Yuhang, GOU Wenjuan, YE Xingyu, DU Tao (*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: Based on the hydraulic model test method, using the hydraulic model of the Yellow River Guxian Water Control Project with a geometric scale of 60, the characteristics of water jet and the pressure characteristics at the floor of the plunge pool of six flip bucket shapes were studied, including continuous, narrow-slit, differential, dovetail, straight edge narrow-slit dovetail and curved narrow-slit dovetail shapes. The experimental results show that the continuous flip bucket water jet has a continuous and concentrated form. The narrow-slit flip bucket of a 30° jet angle does not show a longitudinally stretched water jet shape, with a large internal and external edge trajectory distance and a small water inlet width, and the impact pressure and the fluctuating pressure intensity are larger. The differential flip bucket water jet presents the morphological characteristics of stratified and split strands, the water inlet width becomes larger, and the impact pressure and fluctuating pressure intensity are reduced. The dovetail flip bucket water jet is longitudinally shaped like a broom. The water jet has a large diffusion area, and diffuses, aerates, and dissipates friction fully in the air with a greatly increased water inlet width. No impact pressure occurs in the time-averaged pressure, and the maximum fluctuating pressure intensity is reduced by 59.5%, 69.8%, and 39.4%, respectively, compared with the continuous, narrow-slit and differential flip buckets. The horizontal contraction and longitudinal stretching effects of the curved narrow-slit dovetail flip bucket is better than that of the straight-sided narrow-slit dovetail flip bucket, and the lateral contraction is conducive to the turbulence of the water near the dam and weakens the turbulence of the water in the second dam area. The dovetail flip bucket is conducive to the stability of the plunge pool floor and the downstream energy dissipation and erosion prevention. It has certain reference value in flip bucket shape selection for similar high gravity dams.

Key words: gravity dam; ski-jump energy dissipation; flip bucket shape; water jet characteristics; time-averaged pressure; fluctuating pressure

改革开放以来,我国水利水电建设事业迅猛发展并取得一系列辉煌成就,在建或已建了一批世界

级高水平水利枢纽工程,如:三峡、向家坝、黄登等重力坝式水利枢纽工程,这些工程大多呈现高水头、大

泄洪功率及大单宽流量等特点^[1-2],因此高坝泄洪消能成为水利水电工程建设需要解决的关键技术^[3]。挑流消能常应用于高坝泄洪消能,下游设二道坝或围堰形成水垫塘进行消能^[4]。影响挑流消能的重要因素为挑坎体型,挑坎体型对高速水流的水舌形态和水垫塘消能率有极大的影响,挑坎体型的选择直接关系到水利枢纽工程安全等级指标和泄洪消能率。

众多学者对挑坎体型进行了优化研究并提出了一系列新型挑坎,如:差动式挑坎^[5-7]、窄缝式挑坎^[8-10]、扭曲式挑坎^[11-12]、燕尾式挑坎^[13-15]、窄缝燕尾式挑坎^[16-17]等。张挺等^[5]研究了高扩散低收缩差动式挑坎,发现挑流水舌纵向和横向充分扩散,形成两股水舌碰撞区,水股更分散。孙红娟等^[6]发现差动式挑坎水舌明显分为上下两股,中间形成水帘。蒋俏芬等^[7]发现高差动式挑坎相比窄缝式及低差动式挑坎,水舌纵向拉伸更明显,并有一定横向扩散,落点分布均匀,对河床的冲击压力较小且分散。王瑞等^[8-9]发现曲面贴角与直墙窄缝式挑坎对水舌纵向、竖向拉伸充分,加剧水流紊动和掺气,降低水流紊动系数,但曲面贴角窄缝式挑坎水舌内缘挑距稳定,结构稳定性好,消能率高,对下游消能防冲要求高的工程更为适用。张晓哲等^[10]发现高拱坝深孔采用窄缝式挑坎可使水垫塘底板时均冲击动压分布更加平坦且可大大减小底板动压差。吴新宇等^[11]、刘昉等^[12]研究了扭曲式挑坎,发现采用扭曲式挑坎可合理调整水舌方向,改善下游河道流态、岸坡涌浪及边岸冲刷。王晶等^[13]在燕尾式挑坎的基础上提出阵列式燕尾坎,利用其不同挑角的挑坎将水流充分拉伸、分散,增加各股水舌空间碰撞,增加消能率;程文磊等^[14]发现燕尾式挑坎可有效减小水舌入水单宽流量及其横向扩散,加强水舌顺水流向拉伸,降低对水垫塘底板及岸坡的冲刷;毛栋平等^[15]发现燕尾式挑坎出口水深较小,能大幅降低侧边墙压力及适当降低边墙高度,提高挑流水舌稳定性。彭诚^[16]和谭哲武等^[17]均对窄缝燕尾式挑坎进行了研究,发现窄缝燕尾式挑坎相对燕尾式挑坎水舌在空间纵向拉伸效果更好,可减弱下游河道冲刷。

本文依托黄河古贤水利枢纽水工模型,进行了表孔挑坎体型单体试验,重点对比分析了连续式、窄缝式、差动式、燕尾式、直边窄缝燕尾式及曲面窄缝燕尾式挑坎的水舌特性及水垫塘底板的压强特性,以期挑流消能的高重力坝挑坎体型的选择提供多元化参考。

1 试验设计

依托黄河古贤水利枢纽工程中间泄流坝段中表

孔,古贤重力坝坝踵高程 428 m,表孔堰顶高程 612 m,表孔挑坎为等宽式,宽度 14 m,挑角 30°,出口高程 480 m,水垫塘底板高程 450 m,二道坝高程 470 m、水垫塘长度 300 m,水垫塘静水位 470 m。模型依据重力相似准则,压强比尺与几何比尺均为 60。试验研究在百年一遇洪水位为 625.50 m、设计洪水位为 627.52 m、校核洪水位为 628.75 m,即上游水头 H_u 为 197.50 m、199.52 m、200.75 m 时的中表孔单独泄洪时进行。水工模型整体布置和中间泄流坝段俯视图如图 1 所示。试验所用的挑坎体型结构如图 2 所示。

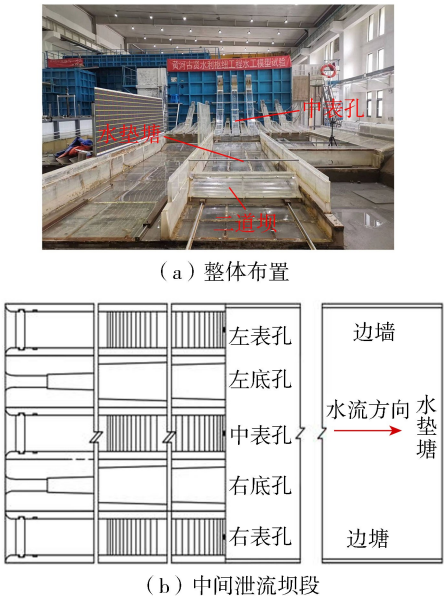


图 1 古贤重力坝水工模型

2 试验结果与分析

2.1 水舌特性

各挑坎体型在上游水头为 199.52 m 时的挑流水舌形态特征如图 3 所示。

为了更直观地反映各挑坎体型之间的差异,对各挑坎体型在不同上游水头下的水舌参数,即内缘挑距、外缘挑距、入水宽度及挑高进行测量,挑流水舌参数如图 4 所示。试验所测水舌参数如表 1 所示。

从表 1 可知,各挑坎体型水舌内缘挑距、外缘挑距及挑高均随上游水头的增加而逐渐增大。结合图 3 可知,连续式挑坎水舌连续,入水宽度小,水舌能量集中,最大外缘挑距为 229 m,最小内缘挑距为 160 m,即水垫塘前 160 m 水垫未充分参与消能。窄缝式挑坎水舌连续且伴有大量喷溅式小水珠,与连续式挑坎相比,水舌挑高增大,挑高最大值为 64 m,内外缘挑距均变短,水舌能量更为集中,水舌并没出现纵向拉伸现象,究其原因,试验中挑坎挑角为 30°,而一般利用窄缝式挑坎形成纵向拉伸水舌的挑角较小,在 -10° ~ 0° 左右,可降低起挑水头,增大水

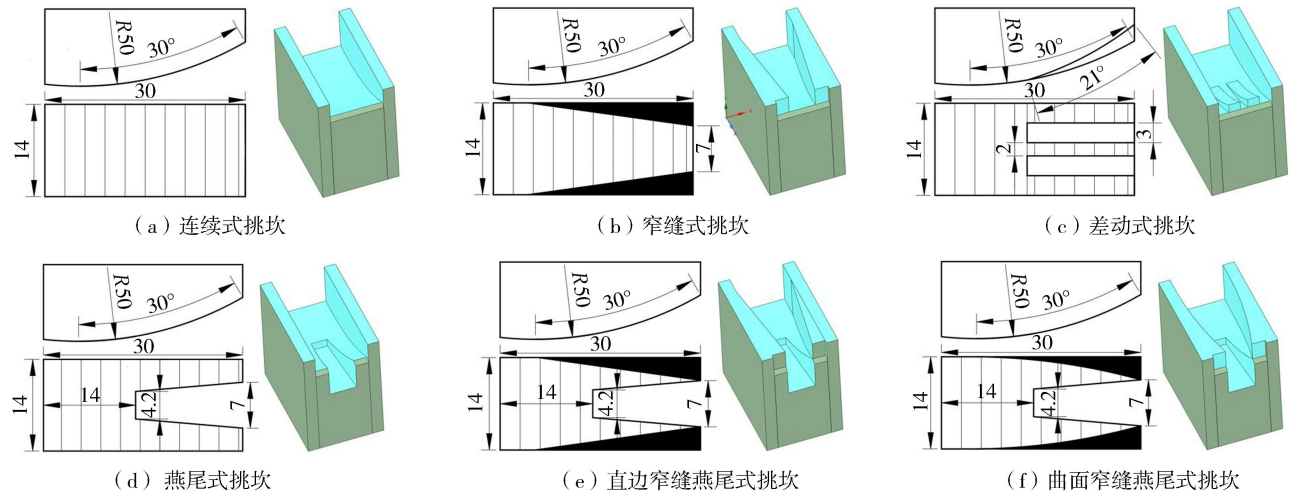


图 2 挑坎体型结构(单位:m)

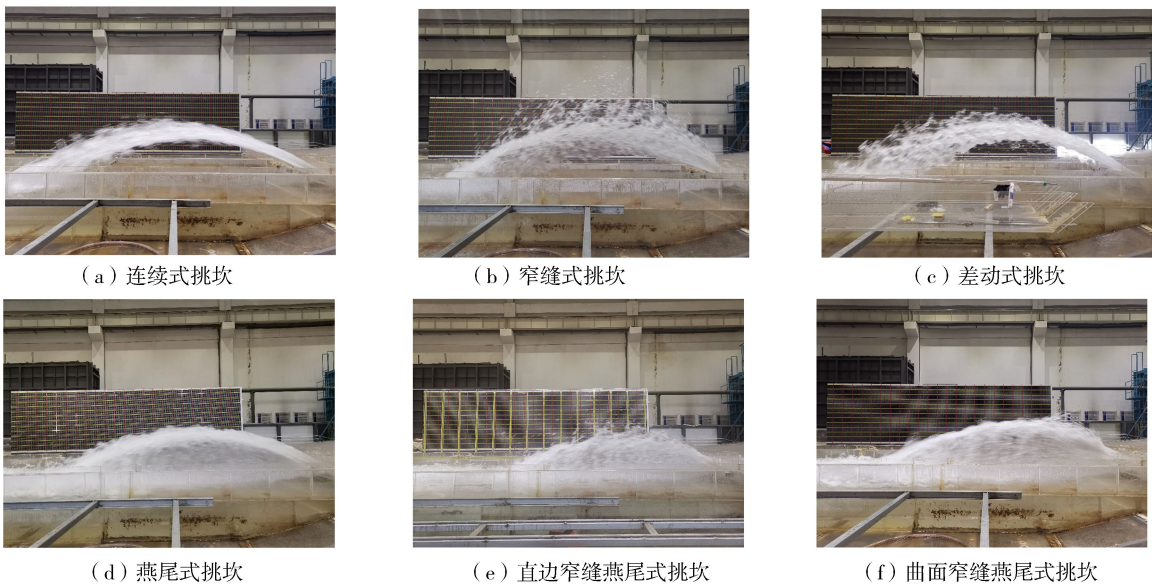


图 3 水舌形态特征

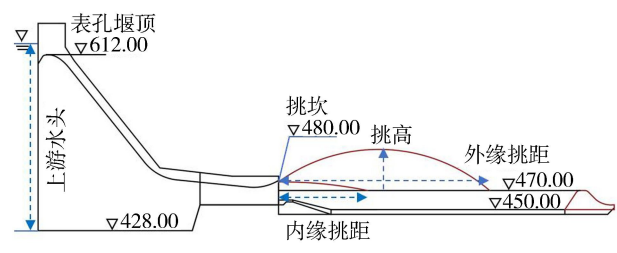


图 4 挑流水舌参数(单位:m)

舌扩散和入水宽度^[18]。差动式挑坎由于坎口存在挑角差,水舌在空中及落点处呈现分层分股的形态特征,入水宽度相对连续式、窄缝式挑坎有所增大,分股落水可使水舌能量相对分散,减小水舌对水垫的冲击,而外缘挑距增大,最大值为 242 m,外缘挑距过大对二道坝及下游防冲不利。当高速水流挑射时,由于燕尾式挑坎存在内外缘挑角差的独特结构,水流

表 1 水舌挑距、入水宽度与挑高

挑坎体型	内缘挑距/m			外缘挑距/m			入水宽度/m			挑高/m		
	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$	$H_u =$
	197.50 m	199.52 m	200.75 m	197.50 m	199.52 m	200.75 m	197.50 m	199.52 m	200.75 m	197.50 m	199.52 m	200.75 m
连续式	160	172	184	198	215	229	38	43	45	40	43	45
窄缝式	153	169	180	195	213	226	42	44	46	58	62	64
差动式	146	168	183	210	227	242	64	59	59	50	52	54
燕尾式	25	28	30	171	181	191	146	153	161	33	35	37
直边窄缝燕尾式	18	20	22	163	171	180	145	151	158	30	33	34
曲面窄缝燕尾式	21	23	26	168	178	188	147	155	162	34	37	39

首先从燕尾坎内缘挑角挑出,然后沿两侧燕尾从燕尾式挑坎外缘挑角挑出,水舌整体明显分成内外两股分开落入水垫,水舌纵向拉伸充分,形成类似“扇形”“水帘”“扫帚”状的水舌形态(下文称“扫帚状水舌”),在空中大大增加了水舌的扩散、掺气及摩擦程度,入水宽度也大大增加,与水垫接触面积更大,更能充分利用水垫塘近坝区水垫进行消能,提高水垫消能率。当 $H_u=200.75\text{ m}$ 时,燕尾式挑坎与连续式、窄缝式、差动式挑坎相比,其水舌内缘挑距分别下降83.7%、83.3%和83.6%,外缘挑距分别下降16.6%、15.5%和21.1%,入水宽度分别增加258%、250%和173%,挑高分别下降17.8%、42.2%和31.5%。燕尾式挑坎的水舌形态特征可使水舌在冲击水垫时携带的动能大大减小,进而减小对水垫塘底板的冲击破坏及下游岸坡冲刷;直边窄缝与曲面窄缝燕尾式挑坎增加对称直边、曲面贴角后,水舌除具有燕尾式挑坎纵向拉伸的特性,同时也具有窄缝式挑坎横向收缩的特性,直边窄缝燕尾式挑坎水舌上产生大量喷溅式小水珠,相比燕尾式挑坎,其内外缘挑距减小、挑高降低;曲面窄缝燕尾式挑坎水舌上产生少量的小水珠,相比燕尾式挑坎,其内外缘挑距略有减小,但挑高增大,上下两股水舌间的扫帚处水量有所增加,扩散更充分、均匀,可见,曲面窄缝对水流横向收缩比直边窄缝更佳。

2.2 水垫塘底板压强特性

通过水舌形态和水舌参数可以直观地对比各挑坎体型间的差异,而挑流水舌冲击下游水垫时水垫塘底板压强的大小及其沿程分布也是研究挑流消能效果和水舌冲击特性的关键^[19-21],重点对水垫塘底板中轴线测点的时均压强、冲击压强及脉动压强进行分析。

2.2.1 时均压强

根据塘内有无水垫,挑流水舌对下游水垫塘冲击射流分为自由冲击射流与淹没冲击射流,试验中水垫塘内有初始静水,水深20 m,冲击射流为淹没冲击射流,在水垫塘内形成自由射流区(I区)、壁面冲击区(II区)和壁面射流区(III区)3个区域,如图5所示。

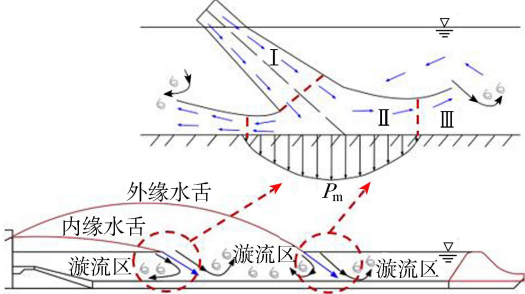


图5 淹没冲击射流

高速射流冲击水垫,在I区经过扩散作用,动能迅速消散,主流两侧形成漩流区,由于水舌斜射入水垫,两侧漩流区并不对称分布;主流经I区进入II区,若主流动能较小,经I区扩散后,其流速变小,未触及水垫塘底板已开始向下游发生偏转,此时下泄主流未触及底板,底板冲击压强基本为零^[22];若下泄主流携带动能较大,主流会冲透水垫,在冲击区内,高速射流携带的巨大动能迅速减小并转化为动水冲击压能,会对水垫塘底板产生强大的冲击^[23],冲击区具有最大压强 P_m 的点称为滞点,滞点与相邻最低谷值点的差值为冲击压强,冲击压强过大会对底板造成冲透破坏;高速射流到达底板后会贴壁射出,由冲击压能转化为动能,射流主流贴壁扩散进入III区,并在III区形成较大的漩流区,向下游扩散形成淹没水跃的流态。

6种体型挑坎在不同上游水头下的时均压强沿水垫塘中轴线的沿程分布如图6所示,以测点相对位置 $x=l/L$ 来表示水垫塘底板压强沿程分布,其中 l 为压强测点距水垫塘首端长度, L 为水垫塘长度^[24]。

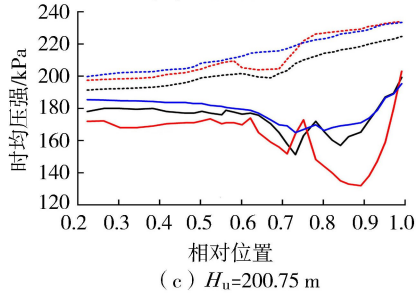
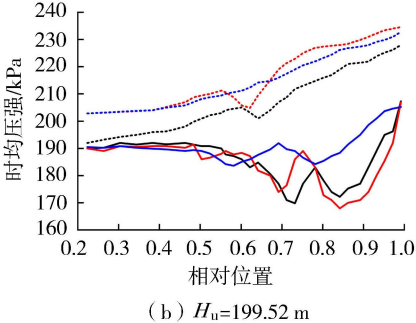
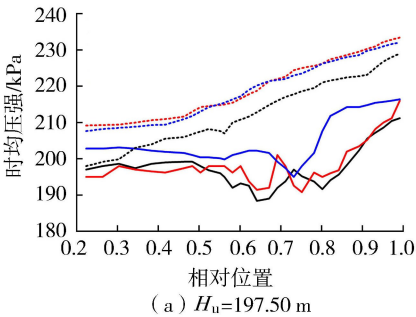
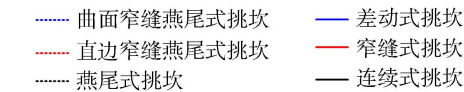


图6 各体型挑坎下游水垫塘底板时均压强沿程分布

从图 6 可知,连续式、窄缝式、差动式挑坎时均压强沿程基本呈先减小后增大再减小再增大的分布趋势。随着上游水头的增大,各挑坎时均压强沿程整体呈减小趋势,在不同上游水头下,燕尾式挑坎时均压强沿程明显高于连续式、窄缝式及差动式挑坎,且燕尾式挑坎沿程均未出现冲击压强,表明其挑流水舌未冲透水垫触及水垫塘底板时其主流已发生偏转,向下游扩散,燕尾式挑坎水舌在空中面积更大,扩散、掺气、摩擦更充分,利用内外两股主流纵向拉伸水舌,冲击水垫时携带动能较小,余动能转化为势能,时均压强整体沿程逐渐增大,出现一个谷值区,该区域为水舌主流冲击区,随着上游水头的增大,水舌携带动能越大,谷值区也越大,谷值点为水舌主流偏转点,随后在下游形成巨大旋滚,携带大量空气进入水体,水体中产生大量气泡,下游水体壅高,势能增大,动能减小,因此,水舌冲击水垫下游段会出现时均压强大于静水压强的区域。连续式、窄缝式及差动式挑坎均产生冲击压强,表明其水舌携带动能巨大,在空中扩散不充分,水舌能量集中,在自由射流区,动能并未充分消除,下泄主流冲透底板,产生冲击压强,其最大冲击压强分别为 20.8 kPa、40.8 kPa、8.3 kPa,窄缝式与差动式挑坎冲击压强最大值较连续式挑坎分别增大 96.2%、降低 60.1%。

从图 6 可知,燕尾式、直边窄缝燕尾式挑坎沿程基本呈先增大后减小再增大的分布趋势且均出现谷值区,直边窄缝燕尾式挑坎谷值区较大,而曲面窄缝燕尾式挑坎时均压强沿程基本呈逐渐增大的分布趋势且没有出现明显的谷值区。可见,曲面窄缝燕尾式挑坎对水流横向收缩纵向拉伸后,水舌扩散充分、均匀,冲击水垫时,其携带动能减小;而直边窄缝燕尾式挑坎水舌能量更加集中,扩散不充分,冲击水垫时,其携带动能增大。

2.2.2 脉动压强

水垫塘作为防护下游河床的结构,其自身稳定性是实现消能和防冲的关键所在。但对于底流消能及挑流水舌未冲透底板等情况时,未出现冲击压强,此时脉动压强也是一个极为关键的参数控制指标。脉动压强主要由主射流在分离或扩散过程形成的大尺度涡流所控制,由水体紊动能转化而来。脉动压强的均方根值直接反应了脉动压强的强度,也称为脉动强度^[25]。因此,对各挑坎在不同上游水头下脉动强度的沿程分布进行对比分析,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,连续式、窄缝式挑坎脉动强度沿程基本呈先增大后减小的分布趋势;差动式、燕尾式、直边窄缝燕尾式与曲面窄缝燕尾式挑坎沿程基本呈先增大后减小再增大再减小的分布趋势;脉动

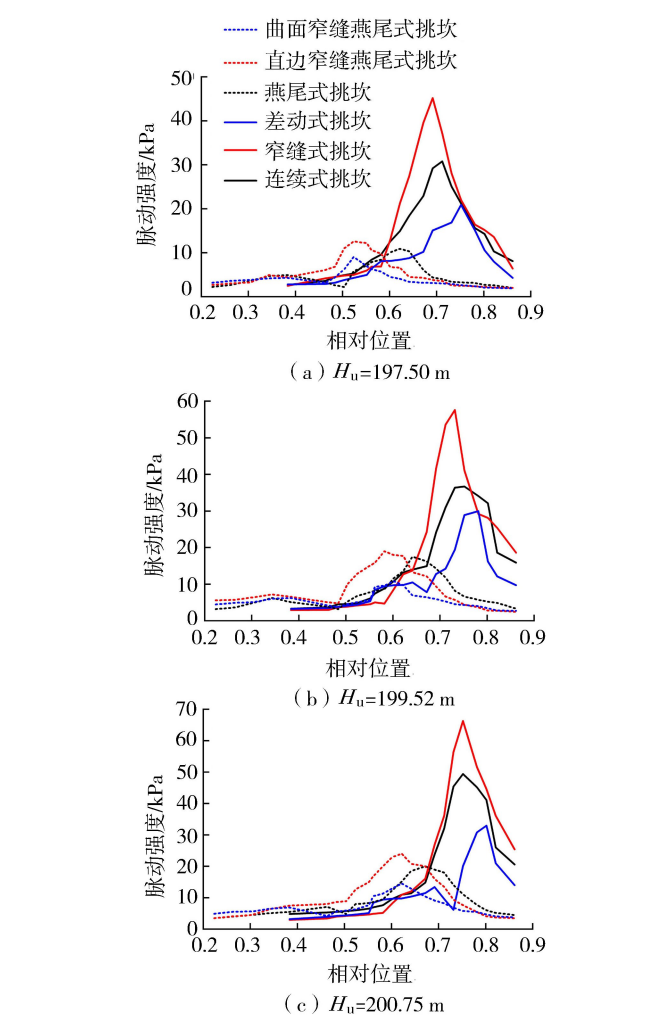


图 7 各体型挑坎下游水垫塘底板脉动强度沿程分布

强度在冲击区内基本呈对称分布,且在峰值点两侧逐渐递减,冲击区内的主流向上下游旋滚、扩散。各挑坎脉动强度随上游水头的增大呈增大的趋势。燕尾式挑坎脉动强度明显低于其余 3 种挑坎,当 $H_u = 200.75$ m 时,连续式、窄缝式、差动式、燕尾式挑坎脉动强度峰值点分别位于 $x = 0.75$ 、 0.75 、 0.78 、 0.67 ,相应的值分别为 49.4 kPa、66.3 kPa、33.0 kPa、20.0 kPa。可见,差动式挑坎与燕尾式挑坎可有效降低水舌对下游水垫的冲击,其中差动式挑坎水舌挑距更远,脉动强度峰值点相对位置最大,其水舌对水垫塘内二道坝及下游岸坡冲刷不利,但燕尾式挑坎脉动强度峰值及相对位置最小,相对于连续式、窄缝式、差动式挑坎,其峰值分别降低 59.5%、69.8% 和 39.4%,相对位置分别降低 10.7%、10.7% 和 14.1%。因此,燕尾式挑坎可有效降低脉动强度峰值及峰值点位置,且沿程未出现冲击压强,对水垫塘底板稳定及下游岸坡防护更为有利。

比较两种不同的窄缝燕尾式挑坎,曲面窄缝燕尾式挑坎脉动强度最大值较小,而直边窄缝燕尾式挑坎脉动强度最大值较大,可见,曲面窄缝燕尾式挑

坎对于水流的横向收缩性及过渡性比直边窄缝燕尾式挑坎要好。整体来看,窄缝燕尾式挑坎可加强水体横向收缩,脉动强度峰值点之前的值整体高于燕尾式挑坎,而峰值点之后的值整体低于燕尾式挑坎,因此,窄缝燕尾式挑坎有利于加强近坝区水体紊动,可同时减弱二道坝区附近水体的紊动,有助于减小水垫塘合适的保护长度,可节省工程造价。

3 结 论

a. 连续式与窄缝式挑坎均呈连续且密实的水舌,水舌能量较为集中,内外缘挑距较大;差动式挑坎水舌呈分层分股的形态特征,内外缘挑距较大,对二道坝及下游冲刷不利,且近坝区水体未能充分参与消能。对于重力坝挑角为 30°的挑坎,窄缝式挑坎未能呈现纵向拉伸的水舌形态,燕尾式挑坎水舌在空中呈扫帚状,水舌面积增大且在空中扩散、掺气、摩擦更充分,入水宽度大大增加,有助于水垫摩擦消能,水舌携带动能小且消散充分。

b. 连续式、窄缝式与差动式挑坎时均压强沿程分布均出现冲击压强且脉动强度最大值较大,而燕尾式挑坎时均压强沿程分布未出现冲击压强且脉动强度最大值较小,相比于上述 3 种挑坎最大值分别降低 59.5%、69.8% 和 39.4%。可见,燕尾式挑坎应用于高重力坝对于水垫塘底板稳定性及下游消能防冲更为有利。

c. 曲面贴角燕尾式挑坎脉动强度最大值为 14.5 kPa,较燕尾式和直边窄缝燕尾式挑坎分别降低 5.5 kPa 和 9.5 kPa,但总体量级均较小,曲面窄缝燕尾式挑坎对于水流的横向收缩与过渡比直边窄缝燕尾式挑坎更佳,窄缝燕尾式挑坎可加强水流的横向收缩与纵向拉伸,有利于加强近坝区水体的紊动及削弱二道坝区附近水体的紊动。

参考文献:

[1] 谢省宗,吴一红,陈文学.我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J].水利学报,2016,47(3):324-336. (XIE Shengzong, WU Yihong, CHEN Wenxue. New technology and innovation on flood discharge and energy dissipation of high dams in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3):324-336. (in Chinese))

[2] 张建民.高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J].水力发电学报,2021,40(3):1-18. (ZHANG Jianmin. Hydraulics of high-speed flows: recent achievements and future outlook[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021,40(3):1-18. (in Chinese))

[3] 潘江洋,冯树荣,李延农,等.新型泄洪消能技术在向家坝水电站中的应用[J].水力发电,2016,42(7):49-52.

(PAN Jiangyang, FENG Shurong, LI Yannong, et al. Application of new energy dissipation technique in Xiangjiaba Hydropower Station[J]. Hydroelectric Power, 2016,42(7):49-52. (in Chinese))

[4] 刘昉,李晓娜,周世佳.高含沙水流作用下水垫塘底板上举力特性试验[J].水利水电科技进展,2020,40(5):13-18. (LIU Fang, LI Xiaona, ZHOU Shijia. Experiment on characteristics of uplift acting on a plunge pool slab in high sediment-laden flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5):13-18. (in Chinese))

[5] 张挺,陈虹,许唯临,等.高扩散低收缩差动挑坎, I :水力特性实验研究[J].水力发电学报,2013,32(5):134-139. (ZHANG Ting, CHEN Hong, XU Weilin, et al. Allotypic hybrid type flip bucket. I. Hydraulic characteristics[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(5):134-139. (in Chinese))

[6] 孙红娟,马飞,骆超.平底差动坎的流态和水舌挑距[J].水电能源科学,2017,35(3):98-100. (SUN Hongjuan, MA Fei, LUO Chao. Flow regime and trajectory distance of jet flow in differential bucket[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3):98-100. (in Chinese))

[7] 蒋俏芬,尹进步,何军龄,等.高差动坎在拱坝泄洪表孔中的应用研究[J].水电能源科学,2017,35(3):78-81. (JIANG Qiaofen, YIN Jinbu, HE Junling, et al. Application of high differential flip bucket in surface spillways on arch dam[J]. Water Resources and Power, 2017,35(3):78-81. (in Chinese))

[8] 王瑞,刘韩生,聂源宏,等.曲面贴角窄缝挑坎在玛尔挡水电站中的应用研究[J].水力发电学报,2015,34(2):85-90. (WANG Rui, LIU Hansheng, NIE Yuanhong, et al. Application of curved slit-type flip bucket at Maerdang hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(2):85-90. (in Chinese))

[9] 王瑞,刘韩生,聂源宏.曲面贴角窄缝挑坎与直墙窄缝挑坎对比研究[J].中国农村水利水电,2014(1):138-140. (WANG Rui, LIU Hansheng, NIE Yuanhong. Comparative study of curved slit-type flip bucket and straight wall slit-type flip bucket[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(1):138-140. (in Chinese))

[10] 张晓哲,李乃稳,李龙国,等.窄缝挑坎在高拱坝深孔中的初步应用研究[J].水利水电技术,2012,43(6):23-27. (ZHANG Xiaozhe, LI Naiwen, LI Longguo, et al. Preliminary application of slit-type flip bucket to bottom outlet of high arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(6):23-27. (in Chinese))

[11] 吴新宇,孙东坡,高昂,等.扭曲鼻坎对泄洪洞挑流消能的影响研究[J].水利水电技术,2014,45(8):56-61. (WU Xinyu, SUN Dongpo, GAO Ang, et al. Study on impact from skew bucket on trajectory bucket energy

- dissipation for flood discharge tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45 (8) : 56-61. (in Chinese))
- [12] 刘昉,王畅,何军龄. 基于正交设计的扭曲鼻坎体型优化试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18 (1) : 166-175. (LIU Fang, WANG Chang, HE Junling. Experimental study on shape optimization of skew bucket based on orthogonal design [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18 (1) : 166-175. (in Chinese))
- [13] 王晶,邓军,吕利,等. 阵列式燕尾坎水力特性研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (3) : 31-37. (WANG Jing, DENG Jun, LYU Li, et al. Hydraulic characteristics of swallow-tailed array flip buckets [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (3) : 31-37. (in Chinese))
- [14] 程文磊,杨庆,昌子多. 燕尾型挑坎在李家岩水库溢洪道中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49 (4) : 63-69. (CHENG Wenlei, YANG Qing, CHANG Ziduo. Application of leak-floor flip bucket to spillway for Lijiayan Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (4) : 63-69. (in Chinese))
- [15] 毛栋平,张法星,钟晓凤,等. 黄登水电站燕尾型挑坎挑流消能适用性试验研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (3) : 104-107. (MAO Dongping, ZHANG Faxing, ZHONG Xiaofeng, et al. Applicability test of swallow-tailed flip bucket ski-jump energy dissipation for Huangdeng Hydropower Station [J]. Water Resources and Power, 2016, 34 (3) : 104-107. (in Chinese))
- [16] 彭诚. 燕尾+窄缝组合消能工水力特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [17] 谭哲武,王均星. 泄洪洞窄缝燕尾组合挑坎试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32 (4) : 40-44. (TAN Zhewu, WANG Junxing. Experimental research on flip bucket combining narrow slit and swallow-tail in flood release tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32 (4) : 40-44. (in Chinese))
- [18] 水利部水利水电规划设计总院. 水工设计手册: 第七卷: 泄流与过坝建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [19] HELLER V, HAGER W H, MINOR H E. Ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131 (5) : 347-355.
- [20] LI N, XU W, ZHOU M, et al. Experimental study on energy dissipation of flood discharge in high arch dams without impact of jets in air [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 8 : 927-933.
- [21] CHEN J G, ZHANG J M, XU W L, et al. Numerical simulation of the energy dissipation characteristics in stilling basin of multi-horizontal submerged jets [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22 (5) : 732-741.
- [22] 王英奎,廖仁强,韩喜俊,等. 深水垫情况下水垫塘淹没射流特征分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47 (1) : 82-84. (WANG Yingkui, LIAO Renqiang, HAN Xijun, et al. Analysis on characteristics of submerged jet flow in water cushion pool with deep water cushion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47 (1) : 82-84. (in Chinese))
- [23] STEINER R, HELLER V, HAGER W H. Deflector ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134 : 562-571.
- [24] 杨敏,李会平,谯文娟,等. 跌坎消力池脉动压强试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2) : 24-29. (YANG Min, LI Huiping, GOU Wenjuan, et al. Experimental study on fluctuating pressure of stilling basin with drop sill [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2) : 24-29. (in Chinese))
- [25] 李春华,李永祥,刘沛清. 水垫塘底板脉动压强量测技术与实验研究[J]. 水利水电技术, 1997, 28 (1) : 53-57. (LI Chunhua, LI Yongxiang, LIU Peiqing. Pulsation pressure measurement technology and experimental research on the floor of Plunge Pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28 (1) : 53-57. (in Chinese))

(收稿日期: 2021 - 07 - 22 编辑: 俞云利)

(上接第 27 页)

- [15] 郑江丽,李兴拼. 基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J]. 水资源保护, 2021, 37 (5) : 30-35. (ZHENG Jiangli, LI Xingpin. Evaluation model of regional water resources carrying capacity based on coordination [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5) : 30-35. (in Chinese))
- [16] 蔡文. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [17] 陈洋波,李长兴,冯智瑶,等. 深圳市水资源承载能力模糊综合评价[J]. 水力发电, 2004 (3) : 10-14. (CHEN Yangbo, LI Changxing, FENG Zhiyao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shenzhen [J]. Hydroelectric Power, 2004 (3) : 10-14. (in Chinese))
- [18] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架 (VIII) : 变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995 (3) : 1-9. (LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII) -variable weights analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995 (3) : 1-9. (in Chinese))
- [19] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报 (理学版), 2004 (2) : 25-29. (ZHANG Xiaoping. Centralization of fuzzy comprehensive evaluation results based on closeness [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2004 (2) : 25-29. (in Chinese))

(收稿日期: 2021 - 10 - 09 编辑: 刘晓艳)