

溪洛渡水电站大型泄洪洞 龙落尾掺气减蚀设计优化研究

杨敬, 刘强

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 水工处, 四川 成都 610072)

摘要:溪洛渡水电站泄洪洞龙落尾段沿程水流流速增加, 压强和空化数沿程降低, 相应带来空蚀破坏问题。为了达到较好的掺气减蚀效果, 采用物理模型试验研究方法, 对龙落尾段底板挑坎+突跌及侧墙收缩体型进行了研究, 研究了底板掺气空腔与侧墙掺气空腔之间的相互关系。在确定底板掺气体型下, 对侧墙掺气进行了详细研究, 以保障掺气设施下游侧良好的水流流态和稳定的掺气空腔形态, 对底板和侧墙起到保护作用。

关键词:溪洛渡水电站; 泄洪洞; 龙落尾; 掺气减蚀; 侧墙掺气

中图分类号: TV7; TV65; TV222

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2014)04-0078-04

1 工程概述

溪洛渡水电站为金沙江下游河段(攀枝花至宜宾)四级开发中的第3级, 是一座以发电为主, 兼顾防洪等综合利用效益的巨型水电站。正常蓄水位高程600 m, 汛限水位高程560 m, 水库总库容126.7亿 m^3 , 调节库容64.6亿 m^3 , 电站总装机容量为13 860 MW。枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝、泄洪建筑物和地下引水发电系统组成, 最大坝高285.5 m。溪洛渡水电站泄洪功率大(近100 000 MW), 泄洪功率为二滩水电站的2.5倍, 堪称世界拱坝枢纽之最。泄洪建筑物由坝身7个表孔、8个深孔, 两岸基本对称布置4条泄洪洞组成。

泄洪洞最大总泄量约为16 648 m^3/s , 约占枢纽总泄洪功率的34%。泄洪洞采用有压平面转弯接无压洞内龙落尾型式, 将70%的水头集中在全洞长25%的龙落尾洞段。

2 泄洪洞龙落尾掺气减蚀情况

左岸1#、2#泄洪洞和右岸3#、4#泄洪洞均由进水闸、有压洞段、地下工作闸间室、无压洞段、龙落尾段和出口明渠及挑坎段等组成, 泄洪洞长度为1.6~1.8 km。龙落尾段与无压洞段典型断面为城门洞型14 m×19 m(宽×高)。龙落尾洞段由抛物线渥奇段、斜坡段、反弧段、出洞斜坡段组成。3#泄洪洞龙落尾剖面见图1。

溪洛渡水电站泄洪洞单洞泄量高达4 162

m^3/s , 单宽流量约300 $m^3/s/m$, 最大流速达到50 m/s量级。研究和工程实践均表明: 随着泄水建筑物的运行水头和泄洪流量的增加, 空化空蚀破坏已成为泄水建筑物破坏的最常见形式, 如胡佛拱坝泄洪洞的空蚀破坏(破坏混凝土及岩石约达5 000 m^3)、龙羊峡水电站底孔侧墙和底板均遭到严重破坏、刘家峡水电站泄洪洞反弧段的多次空蚀破坏、二滩水电站1#泄洪洞龙抬头下游的空蚀破坏等^[1], 而采用适当的掺气是防止出现空化空蚀破坏最有效的措施。笔者通过对溪洛渡水电站3#泄洪洞龙落尾段渥奇段后的1#掺气坎的底板挑坎+突跌及侧墙收缩体型进行设计优化研究, 以达到掺气减蚀效果, 保护底板和侧墙。

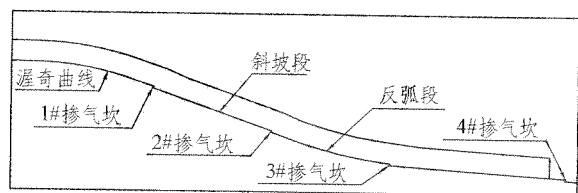


图1 3#泄洪洞龙落尾剖面图

3 水工模型及掺气减蚀体型

3.1 水工模型

水工模型按照重力相似准则设计, 模型线性比尺为1:25。根据前期研究成果, 泄洪洞龙落尾基本体型已确定, 1#掺气坎上游坡度为1:2.513, 下游坡度为1:2.419 35。1#掺气坎三维示意图图2。

3.2 试验体型

收稿日期: 2014-04-07

体型1~4用于研究突跌高度和底板挑坎对底空腔掺气的影响;体型5~8用于研究底板挑坎和边墙侧坎对底空腔和侧空腔掺气的影响;体型9~12在确定底板挑坎体型前提下进一步研究边墙侧坎对掺气的影响,具体参数见表1、2。

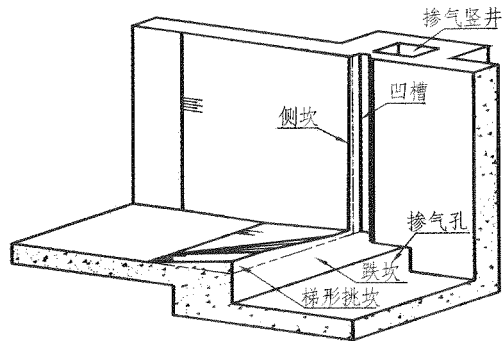


图2 1#掺气坎三维示意图

表1 底板挑坎体型参数表

体型	挑坎体型	跌坎高度	挑坎高度	挑坎长度	相对坡比
		/m	/m	/m	
1	连续	1.5	0.5	3	1:6
2	连续	1	0.5	3	1:6
3	U型	1.5	0.45	6.75	1:15
4	V型	1.5	0.5/0.15	6	1:12/1:40

表2 底板挑坎+侧收缩坎体型参数表

体型	挑坎体型	跌坎高度	挑坎高度	挑坎长度	底板	侧坎上宽	侧坎下宽	侧坎长度	侧坎相对坡比	备注
		/m	/m	/m	相对坡比	/m	/m	/m		
5	连续	1.5	0.5	3	1:6	0.17	0.17	3.4	1:20	
6	M型	1.5	0.875	7	11:8	0.15	0.15	6	1:40	
7	M型	1.5	0.25/0.75	3	1:12~1:4	0.15	0.15	6	1:40	侧坎后设置凹槽
8	梯形	1.5	0.25/0.625	3	1:12~1:4.8	0.15	0.15	6	1:40	同上
9	梯形	同上	同上	同上	同上	0.125	0.125	6	1:48	同上
10	梯形	同上	同上	同上	同上	0.175	0.175	6	1:34.3	同上
11	梯形	同上	同上	同上	同上	0.225	0.225	6	1:26.7	同上
12	梯形	同上	同上	同上	同上	0.11	0.175	6	1:34.3~54.5	同上

(3)侧收缩研究。

由于高速水流对侧坎体型比较敏感,通过体型9~12底坎和侧坎组合试验,在确定底坎型式的前提下,进一步研究了侧坎体型及尺寸对掺气的影响,以确定最终的掺气坎体型。

4.2 掺气空腔分析

试验以工作闸门全开、设计洪水位泄洪为典型工况进行比较试验,实测不同体型掺气坎后的底空腔长度列于表3。

(1)底板突跌研究。

体型1为连续挑坎型式,底流水舌冲击底板

4 掺气减蚀成果分析

4.1 试验阶段

(1)底板突跌研究。

底板形成稳定空腔时,高速水流表面受裂散作用,大气能掺入表层水流。受重力影响,气泡只能存在于水气分界面附近不断掺入和溢出。挑坎使水流下部产生强烈紊动,水体表面气泡在水流紊动剪切作用下逐渐破碎形成更小的气泡,并克服水流阻力和空腔负压作用而深入到水体内部,从而实现掺气。

(2)底板+侧收缩研究。

受重力影响,掺入底层水流的气泡不断上升并溢出,同时,在高速水流的携带作用下,在挑坎后边墙上形成一个三角形清水区,高流速下该清水区易出现空蚀破坏。通过底板+侧收缩试验,研究了通过侧墙收缩、增加水流紊动并通过侧坎后负压区联合作用,达到侧墙掺气以保护坎后边墙的目的。体型5~8用于研究底板挑坎如边墙侧坎对底空腔和侧空腔掺气相互关系及影响,调整底部挑坎型式,达到水流平顺,并形成掺气稳定的底空腔和侧空腔。

后形成冲击区,受水深大、重力影响,挑坎处水流

表3 库水位高程600.63m不同体型底空腔长度表/m

项目	体 型							
	1	2	3	4	5	6	7	8
左	23.5	23	16.5	17.5	27.5	15	18.8	15.8
中	—	—	—	—	—	—	—	22.8
右	22.3	21.5	17.5	17	25.3	14.3	18	17

底部静压大而使得挑射水流的出射角较小,相应导致空腔末端射流入射角也较小,反向射流形成回水,底空腔内存在一定的回壅积水。体型2减小了挑流水舌与底板的冲击角度,以降低冲击引起的回壅积水。跌坎高度减小后空腔高度相应减小,且底板坡度已经较陡,底空腔内回水没有明显

的消退。

体型3和体型4底空腔呈中间短、两边长的形态,利用中间水舌向下游的冲击水流以减弱两侧冲击水流的回流状态。由于挑坎高度偏小,两侧底空腔长度缩短,中间水舌对回水的抑制作用不明显。

(2) 底板+侧收缩研究。

体型5在体型1的基础上,在两侧边墙增设了连续性收缩挑坎,坎后能形成较长的侧空腔,但在边墙水舌交汇区易产生水翅,底空腔末端存在少量积水。

侧向空腔存在时,靠边墙部位正向射流受约束较小,易形成水翅;如果侧空腔长度大于底空腔长度,底板两侧正向射流直接沿侧空腔通道发展,从而形成明显的水翅;如果侧空腔长度小于底空腔长度,当底板两侧正向射流位于侧空腔负压区时,底板两侧正向射流也易于通过该区域形成水翅。侧向空腔水力特性见图3。

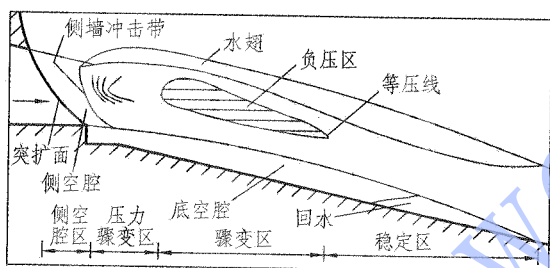


图3 突跌侧收缩体型侧墙水力特性示意图

体型6底空腔呈M型,通过两侧小范围正向射流减弱主流正向射流引起的水翅现象。虽然侧空腔较长,边墙没有产生明显的水翅,但底空腔内仍存在较多积水。

体型7在边墙收缩挑坎后设置了掺气凹槽,使边墙侧空腔上下贯通,通气良好。侧空腔较长,形态稳定,边墙无明显水翅现象,但下游边墙水流携有大量细小气泡。

考虑施工方便而简化了体型,体型8将底部M型挑坎改为梯形挑坎型式,底空腔呈中间长、两边短的梯形形态,回水略有减少,通气顺畅;下游边墙水流掺气效果好,无明显水翅现象,主流平稳顺畅。

(3) 侧收缩研究。

体型9的底空腔和侧空腔形态与体型8相似。底空腔内回壅水流稀少,随水位升高回壅水

流有增加趋势,但不影响通风孔通气。

体型10的底空腔和侧空腔形态与体型8相似。侧坎下游边墙附近有时会产生轻微水翅。

体型11的底空腔和侧空腔形态与体型10相似。侧坎收缩比过大影响表面水流的稳定性和下游边墙掺气的均匀性;侧坎处出现不稳定的扰动激波;侧空腔呈矩形分布,其正向射流沿边壁发展形成稳定水翅,部分触及洞顶,下游边墙中间出现条带状的清水区。

体型12的侧坎高度采用上窄下宽式,侧向空腔形态稳定,呈梯形分布,上层水舌挑距较下层短,对水翅有一定的约束作用,掺气均匀,水面平顺。底空腔形态稳定,有不稳定的回壅水流,但不影响通风孔通气。

(4) 小结。

综合考虑1#掺气坎后底板和边墙掺气水流的挟气能力和效果、水流流态、空腔形态等因素,以体型12为推荐施工体型。

4.3 压力成果分析

在1#掺气坎(体型8)下游底板正向射流冲击区附近,动水压力局部突然增大,其值随库水位增高水流流速增加而加大。由图4可见,闸门全开,库水位从高程560 m升高至608.9 m时,实测最大冲击压力值从82.06 kPa增大至156.7 kPa。掺气坎底空腔内压力测点的实测压强均很小或为负值。

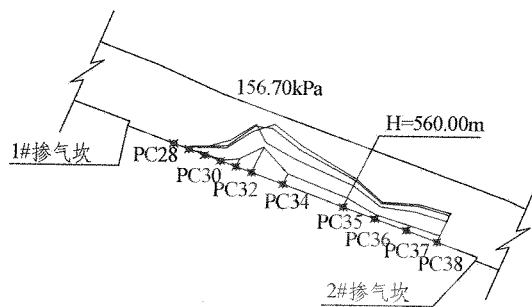


图4 1#掺气坎下游底板压力分布图(体型8)

由图5可知,体型8~12的侧空腔内均为负压,最小负压值为-4.5 kPa;侧坎正向射流冲击区动水压强快速升高,呈现凸峰形状,水位高程600.63 m下实测压强的最大值为134.8 kPa,压强大小与该点水深形成的静压强接近,没有明显的冲击作用。有、无侧坎时压力分布基本接近,边墙动水压强出现峰值的位置与底板压强增大的位置

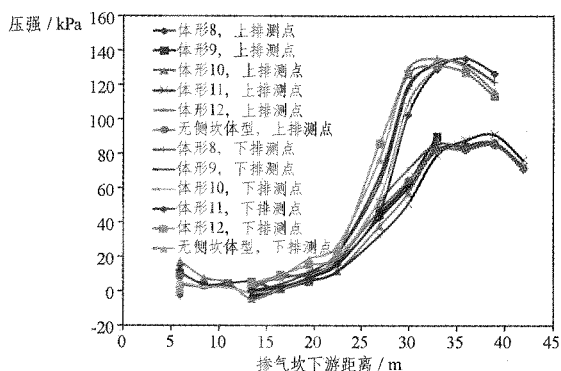


图5 掺气坎下游侧壁压强分布图(高程 600.63 m)
一致,说明该部分边墙压力的凸峰分布主要受底空腔及底板冲击压力的影响,边墙侧向冲击对侧壁压力的影响不大。

4.4 通气井风速及通气量

掺气坎不同体型左右通气井风速及通气量见表4。未设置侧坎且底坎较高时,底空腔长度较长,通气井风速较大;设置侧坎且侧坎较高时,形成较长的底空腔和侧空腔,通气井风速最大,但易出现水翅,侧面水流掺气不均匀;在确定底板掺气体型的前提下,适当增加侧坎高度,通风孔风速及通风量略有增大。

表4 掺气竖井风速及通气量表(高程 600.63 m)

体型	左侧掺气竖井		右侧掺气竖井	
	风速 /m·s ⁻¹	通气量 /m ³ ·s ⁻¹	风速 /m·s ⁻¹	通气量 /m ³ ·s ⁻¹
体型1	21.9	52.5	21.9	52.5
体型2	21.3	51	20.6	49.5
体型3	12.2	29.3	12.5	30
体型4	13.8	33	13.8	33
体型5	33.8	81	32.5	78
体型6	17.5	42	16.9	40.5
体型7	21.3	51	21.9	52.5
体型8	23.1	55.5	23.8	57
体型9	15	36	15.2	36.5
体型10	18.5	44.4	17	40.8
体型11	18	43.2	17.5	42
体型12	19.5	46.8	20.3	48.7

4.5 掺气浓度

体型12的底板水流冲击区及下游底板附近的水流掺气浓度基本符合沿程衰减规律,由5.1%衰减至最小值0.1%。边墙未设侧掺时,1#掺气坎下游较远处边墙实测最小水流掺气浓度为

0.1%,设置侧掺后边墙实测最小水流掺气浓度为1.8%,说明边墙设置掺气坎能有效增强掺气效果。

5 结语

笔者通过模型试验的方法,结合二滩等水电站掺气减蚀成果,进一步研究了底板掺气空腔和侧墙掺气空腔之间的相互关系,在确定底板掺气体型下对侧墙掺气进行详细研究后得出的结论:

(1)在上下游坡度确定的条件下,受坎后顶拱高度限制,挑坎坎高不易过大,否则挑射水流易冲击下游顶拱;底层挑流水体在上部高速水体重力作用下很快回到底板,在相对坎高的前提下,坎上相对坡度越缓,空腔长度越短。

(2)针对底部水舌冲击产生回水,底板采用U、V型挑坎,中间水舌相对两侧较短,其阻止回水作用不明显。

(3)增加侧收缩坎,能有效消除掺气坎后侧墙的清带。

(4)侧坎后设置边墙掺气凹槽,使侧空腔上下贯通,增加通气面积,通气更为稳定通畅,明显增强了边墙近壁水流的掺气效果。

(5)侧向收缩坎与底板挑坎相互影响大。侧向掺气空腔不宜大于底部空腔,底部水舌两侧宜短于中间水舌,以减弱或消除水翅现象。

(6)侧向收缩坎末端宽度适当增加,水流挟气能力略强,但增大一定程度时水流将出现不利流态。

(7)侧向收缩坎宽度采用上窄下宽型式,可明显消除边墙侧向挑流水舌正向射流形成的水翅。

截至2014年2月底,溪洛渡水电站泄洪洞经历了6次初期运行,经现场巡视检查,泄洪洞龙落尾段未见空蚀现象。

参考文献:

[1] 练继建.高坝泄洪安全关键技术研究[J].水利水电技术,2009,40(8):80~88

作者简介:

杨 敬(1978-),男,四川乐山人,副主任,高级工程师,硕士,从事水工设计工作;

刘 强(1979-),男,山东沂水人,高级工程师,硕士,从事水工设计工作。

(责任编辑:李燕辉)