

澜沧江小湾水电站泄洪消能 问题研究

周 胜 马洪琪 喻建清 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

澜沧江小湾水电站泄洪消能 问题研究

周 胜 马洪琪 喻建清 等 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了澜沧江小湾水电站各个设计阶段泄洪消能问题研究的主要成果,内容包括:泄洪消能建筑物总体布置;坝身泄水孔和消能水垫塘的具体布置与体型;坝身与岸边泄量分配;单洞与双洞布置方案的利弊分析;泄洪洞总体布置模式与预防水流空化空蚀破坏的新思路;泄洪消能可靠性分析与运行调度建议等。这些研究的主要成果已被设计采纳。

本书可供从事水利水电工程设计、科研和管理等工作的技术人员参考,也可供高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(C I P)数据

澜沧江小湾水电站泄洪消能问题研究 / 周胜等著

· 一 北京:中国水利水电出版社,2013.2

ISBN 978-7-5170-0657-2

I. ①澜… II. ①周… III. ①澜沧江—水力发电站—泄洪消能—研究 IV. ①TV73

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032045号

书 名	澜沧江小湾水电站泄洪消能问题研究
作 者	周胜 马洪琪 喻建清 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16印张 380千字
版 次	2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《澜沧江小湾水电站泄洪消能问题研究》

编写人员

中国水利水电科学研究院

周 胜 刘之平 郭 军 乾爱国

华能澜沧江水电开发有限公司

马洪琪 艾永平 谢力明 易 魁

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院

喻建清 杨宜文 许 晖 马 麟 官忠瑞

前言

澜沧江小湾水电站是中下游河段梯级开发的龙头水库和巨型电站。双曲拱坝最大坝高 294.5m, 最大下泄流量 $20745\text{m}^3/\text{s}$, 相应的水头落差 226.2m, 泄洪功率 46000MW, 均居当时世界同类坝型第一, 总库容 150 亿 m^3 , 坝址区河谷狭窄, 两岸山坡陡峻, 水面宽度小, 泄洪消能难度大, 泄洪消能问题是工程建设的关键技术问题之一。设计建设过程中, 昆明勘测设计研究院、华能澜沧江水电有限公司始终把它放在极其重要的位置, 组织有关科研单位和院校参与模型试验研究和分析计算等国家重点科技攻关项目。经过各方努力, 高效而出色地解决了工程设计中遇到的一系列相关难题, 为优化设计提供了科学依据, 技术上有创新, 主要研究成果已在工程建设中实施应用。

本书简述了小湾水电站的水文水库特性、地形地质条件和枢纽布置概况, 扼要地介绍了国内外高拱坝泄洪消能建筑物的布置模式、运行情况及存在的主要问题, 旨在吸取有益的经验与教训, 结合本工程特点优化泄洪消能设计, 为技术创新拓宽思路、开辟新途径; 随后, 详细介绍各个阶段的泄洪消能问题研究成果, 主要包括以下内容:

(1) 泄洪消能建筑物总体布置研究。主要研究泄洪消能建筑物的总体布置模式、坝身与岸边的泄量分配, 以期实现布局合理、运行安全可靠、调度灵活、维护检修方便、施工难度降低、工程量省等综合目标, 并为各套泄水建筑物的布置与体型优化奠定基础, 使泄洪消能设计水平上一个新台阶。

(2) 坝身泄洪消能建筑物布置与体型研究。小湾水电站坝身设 5 个表孔和 6 个中孔, 是枢纽的主要泄洪通道, 直接关系到大坝安全和正常发电, 务必运行可靠。本研究通过表中孔的合理布置与体型优化, 达到各自单独泄洪时各股射流在空中分层拉开明显, 能充分自由扩散, 纵横方向无重叠与搭接, 有利于减小水垫塘冲击压力和岸边雾化降雨强度; 联合泄洪时能保持射流在空中碰撞消能扩散效果好, 对水垫塘冲击压力小、并能兼顾雾化降雨强度相对较小的目标。总的思路是从扩大射流分层间距和减小单位面积入水流量着手, 使射流入水后仍能充分紊动扩散消能, 临底流速小, 实现水垫塘流态、冲击

压力、岸边雾化降雨强度等各项水力学指标均优的目标。研究成果表明,经过科技人员的共同努力、专家组的严格审查把关,不仅很好地解决了可行性设计研究阶段遇到的表孔单独泄洪水垫塘冲击压力大幅超标、射流入水冲击区离坝趾过近的问题,还通过不断优化,进一步达到表孔、中孔单独泄洪水垫塘冲击压力很小、联合泄洪水垫塘冲击压力也远小于设计控制值的理想水力学指标,从而为增大坝身泄量,优先运用操作简便、调度灵活、运行可靠、检修方便的表孔泄放各级洪水流量,尤其是宣泄常遇洪水流量创造了十分有利的条件。

(3) 泄洪洞布置与体型研究。泄洪洞是本枢纽三套泄水建筑物之一,互为备用,使整体运行更安全可靠、调度灵活与检修方便,也是重要的泄洪通道。本研究结合坝址地形地质条件和水文水库特性,重点研究了泄洪洞的流量规模、单洞与双洞方案的利弊、进出口布置和体型、工作闸门设置位置等主要问题。分析研究表明,无论从运行安全还是技术经济合理考虑,单洞布置方案都占有明显优势。另外,针对高水头泄洪洞易发生水流空蚀的问题,书中除着重研讨了陡缓坡直线段的衔接形式,还引进了台阶消能理念,拟结合本工程的特点,充分利用施工条件,适度增加掺气坎的坎高与数量,以增加局部水头损失、调控缓坡直线段的坡度,扼制沿程流速增长,同时达到增长空腔长度、缩短掺气坎保护长度,增加水流掺气浓度的目的。采取既提高水流自身抗空化能力,又提高掺气坎减蚀效果的新思路,以期全面解决泄洪洞易发生空蚀破坏的棘手难题。

(4) 泄洪消能可靠性和运行调度分析研究。通过对表孔、中孔、泄洪洞和坝后水垫塘等泄洪消能建筑物的运行可靠性分析研究表明,小湾水电站利用坝身作为主要泄洪通道,采用挑跌流相结合、空中碰撞和水垫塘消能的模式,各项水力学指标均优,大坝和水垫塘的安全是有保证的。为确保度汛安全,制订合理的泄洪运行调度规程与细则至关重要。根据各泄水建筑物的水力学研究成果、地形地质条件和工程运行经验,建议优先利用表孔泄洪,尤其是宣泄常遇洪水流量。二滩水电站高双曲拱坝泄洪观测表明,中孔出射的水流入水角度比表孔小,岸坡雾化降雨强度特别大,而小湾坝址两岸山坡陡峻,故为降低泄洪雾化降雨引起滑坡的风险,中孔宜押后运行。泄洪洞缓坡直线段的坡度取值偏大,沿程流速超过 40m/s 的高流速区范围大,为预防侧墙空蚀可能引起洞身严重破坏,除押后运行外,还建议一般以闸门局部开启运行较为稳妥,因为这种运行方式单宽流量和水深小,弗劳德数大,掺气坎后回溯水流少,空腔长度长,水流掺气浓度高,减蚀效果好,有利于保护侧墙

免蚀。

小湾水电站特高双曲拱坝坝身泄水建筑物 2009 年后期施工导流期间曾投入运行。泄水后，坝后消能水垫塘排干水检查，完好无损。初步表明坝身泄洪消能建筑物的设计与科研工作是卓有成效的，施工质量是有保证的。

本书由马洪琪院士组织编写并审稿。华能澜沧江水电有限公司、中国水利水电科学研究院和中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院及相关工程技术人员与科研人员给予了大力支持，特此致谢。

希望本书对水利水电工程设计、科研和工程管理等技术人员有所裨益，并为高等院校相关专业师生提供参考。

编著者

2012 年 10 月



目 录

前言

第 1 章 小湾水电站工程概况	1
1.1 水文特点	1
1.2 泥沙	2
1.3 水库特性	2
1.4 地形地质特点	3
1.5 枢纽布置简述	3
第 2 章 高拱坝泄洪消能布置与运行情况	5
2.1 国内外高拱坝泄洪消能布置综述	5
2.2 卡里巴双曲拱坝下游河床冲刷	8
2.3 隧洞泄洪与空蚀破坏	10
第 3 章 小湾水电站泄洪消能布置	26
3.1 小湾水电站的泄洪消能特点和水力学指标	26
3.2 小湾水电站的泄洪消能布置原则	26
3.3 小湾水电站泄洪消能布置模式和泄量分配问题	27
第 4 章 “八五” 国家科技攻关小湾水电站坝身泄洪消能研究	29
4.1 设计单位对坝身孔口布置的依据	31
4.2 溢流表孔泄洪布置方案和体型优化研究	31
4.3 浅孔泄洪布置方案和体型优化研究	65
4.4 中孔布置和体型优化研究	73
4.5 坝后消能水垫塘研究	83
4.6 电站尾水波动	93
4.7 小结	93
第 5 章 “八五” 国家科技攻关小湾泄洪洞布置和体型优化研究	96
5.1 简述	96
5.2 初步设计阶段泄洪洞的布置（双洞方案）	96
5.3 泄洪洞体型设计	98
5.4 “八五” 国家科技攻关阶段泄洪洞试验研究成果	99

5.5 小湾泄洪洞需要继续深入研究的问题	110
第 6 章 “九五” 国家科技攻关单泄洪洞方案泄量分配研究	112
6.1 简述	112
6.2 加大中孔泄量减少一条泄洪洞方案研究	114
6.3 加大表孔泄量减少一条泄洪洞方案研究	120
6.4 同时加大中表孔泄量减少一条泄洪洞方案研究	123
6.5 中孔新设计体型的初步研究成果	124
6.6 小结	126
第 7 章 “九五” 国家科技攻关坝身泄洪消能布置研究	128
7.1 简述	128
7.2 泄流能力	135
7.3 中孔新设计体型表孔“八五”攻关优化体型方案研究	135
7.4 新设计方案坝身泄洪消能布置深化研究	139
7.5 小结	156
第 8 章 小湾水垫塘动床模型试验研究	158
8.1 坝后消能水垫塘加固形式简述	158
8.2 基岩抗冲流速对水垫塘冲刷深度影响研究	160
8.3 加高二道坝减小水垫塘冲刷深度研究	171
8.4 预开挖水垫塘冲刷深度研究	175
8.5 小结	180
第 9 章 单泄洪洞方案出口体型优化研究	182
9.1 简述	182
9.2 泄洪洞出口采用单圆弧挑流鼻坎方案研究	183
9.3 泄洪洞出口采用扭曲挑流鼻坎方案研究	184
9.4 小结	195
第 10 章 小湾泄洪洞新布置方案体型优化研究	197
10.1 高水头大流量泄洪洞破坏原因分析	197
10.2 避免与减轻水流空化空蚀破坏的途径	198
10.3 泄洪洞新布置方案体型优化问题讨论	199
10.4 泄洪洞体型优化方案建议	205
10.5 小结	219
第 11 章 小湾水电站泄洪消能可靠性分析	221
11.1 简述	221
11.2 坝身表孔泄洪可靠性分析	222
11.3 坝身中孔泄洪可靠性分析	222
11.4 表孔、中孔联合泄洪可靠性分析	223

11.5	坝后水垫塘泄洪消能可靠性分析	224
11.6	坝身泄洪雾化对大坝安全影响分析	226
11.7	泄洪洞运行可靠性分析	232
11.8	单洞与双洞布置方案泄洪安全可靠对比分析	233
11.9	对运行管理和泄洪调度的建议	235
11.10	小结	237
第 12 章	结语	239
参考文献及参考资料		245

第 1 章 小湾水电站工程概况

小湾水电站位于云南澜沧江中游，为中下游河段规划的八个梯级电站中的第二级，是梯级开发的龙头水库和巨型电站。枢纽工程由混凝土双曲拱坝、坝身泄水孔、坝后水垫塘和二道坝、左岸永久泄洪隧洞和施工导流洞、右岸地下引水发电系统等组成。最大坝高 294.5m，居世界前列，电站正常蓄水位 1240m，水库总库容 150 亿 m^3 ，设计装机容量 $6 \times 700\text{MW}$ ，保证出力 1778MW，多年平均发电量 190 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}^{[1]}$ 。本工程库容大，调节能力强，建成后将提高下游梯级电站保证出力，增强云南电网的调节能力及改善系统电能质量，意义重大。

1.1 水 文 特 点

工程水文设计是依据坝址下游 76km 戛旧水文站 1957~1991 年系列实测资料，按控制流域面积推算而得，可信度较高。根据实测资料和历史洪水调查，坝址处径流特征值^[1]为：

多年年平均流量	1210 m^3/s
多年平均年径流量	382 亿 m^3
实测最大流量	9150 m^3/s
实测最小流量	273 m^3/s
调查历史最大洪水流量（1905 年）	11700 m^3/s

小湾坝址控制流域面积 11.33 万 km^2 ，径流以降雨补给为主，枯汛期明显。径流年际变化均匀稳定，变差系数小，丰水期主要集中在 5~10 月，暴雨主要出现在 6~9 月，最小流量一般出现在 2 月底，洪水过程复峰型多，洪峰量大，历时长，单峰型洪水过程历时约 9 天，双峰型历时约 17 天，多峰型历时约 25 天，其中对调洪起控制作用的时间约 15~20 天，坝址主汛期设计洪水成果见表 1.1^[2]，水位流量关系见表 1.2。

表 1.1 小湾水电站坝址主汛期设计洪水成果表

洪水频率 (%)	洪峰流量 (m^3/s)	洪 量 (亿 m^3)			
		3 天	7 天	15 天	30 天
0.01	23600	54.5	123	230	372
0.02	22000	51.0	114	215	348
0.1	18300	42.4	95.0	178	291
0.2	16700	38.8	86.7	163	266
0.5	14600	34.0	75.6	142	234



续表

洪水频率 (%)	洪峰流量 (m³/s)	洪 量 (亿 m³)			
		3 天	7 天	15 天	30 天
1	13100	30.4	67.3	127	210
2	11500	26.8	59.0	112	185
5	9410	22.1	48.2	91.5	153
10	7860	18.5	40.0	76.4	129
20	6330	15.0	32.0	61.5	105
50	4360	10.4	21.9	42.4	73.5
实测最大	9150	21.4	48.6	95.4	—

表 1.2 水位流量关系 (Ⅱ 坝线下游 500m 处)

频率 (%)	50	20	5	2	1	0.2	0.1	0.01
流量 (m³/s)	4360	5417	9035	11066	12529	15666	17815	20683
水位 (m)	1000.25	1001.82	1006.48	1008.51	1010.01	1012.71	1014.43	1016.64

1.2 泥 沙

小湾坝址处多年平均悬移质年输沙量 4799 万 t，其中汛期（5~10 月）占全年输沙量的 95.9%，多年年平均含沙量 1.26kg/m³，实测最大含沙量 33.9kg/m³。估算推移质年输沙量 150 万 t。

1.3 水 库 特 性

正常蓄水位	1240.00m
死水位	1166.00m
百年洪水位	1236.87m
设计洪水位 (p=0.2%)	1238.05m
校核洪水位 (p=0.01%)	1242.87m
防洪限制水位	1236.00m
淤沙高程 (100 年淤积标准)	1097.00m
总库容	150 亿 m³
调节库容	99 亿 m³
库容系数 (调节库容/年径流量)	0.26
调节性能	多年调节



1.4 地形地质特点

枢纽区河段长 2300m, 河道流向由北向南, 略向东偏, 枯水期水面高程约 988.00m, 河宽 80~100m, 水深 4~10m。河谷呈 V 字形, 两岸山坡陡峻, 在高程 1600.00m 以下, 平均坡度为 $40^{\circ}\sim 42^{\circ}$, 局部地段为悬崖峭壁, 两岸冲沟发育。坝线以下 400m 范围内, 河床冲积层厚度一般为 17~28m, 最厚 30.8m, 河床基岩面顶高程为 952.00~967.00m, 总体高程在 960.00m 以上。

枢纽区内基岩面主要为角闪斜长片麻岩和黑云花岗片麻岩, 夹有少量片岩。在水垫塘 480m 长范围内, 河床部分表面基岩以微风化岩体为主, 两岸建基面部分以弱、微风化岩体为主。微风化岩体内平均湿抗压强度大于 95MPa。节理裂隙主要分布有三组: 第一组与河流近垂直的东西向陡倾角倾向上游的节理, 倾角 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ (与岩层面一致); 第二组为近南北向顺河的陡倾角节理, 倾向河床, 倾角 $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$; 第三组为近南北向中缓倾角节理, 倾向河床, 倾角 $32^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。前二组节理发育, 第三组相对不太发育。各组节理在微风化岩体内, 节理闭合, 间距大, 延伸不长。岩体块度相对较小, 河床部位节理块尺寸 $0.3\text{m}\times 0.5\text{m}\times (0.4\sim 2.0)\text{m}$, 抗冲流速为 12m/s。泄洪洞出口挑流水舌入水区距大坝 1400~1600m, 该范围内基岩与水垫塘基岩基本一致。

本地段内地应力较高, 两岸一般为 8~17MPa, 河谷出现应力集中现象, 达 40~57MPa。

小湾坝址区地震基本烈度Ⅷ度, 抗震按 100 年超越概率 2%, 水平峰值加速度值 $a=0.313g$ 设计。

1.5 枢纽布置简述

小湾水电站位于高山峡谷及强地震区域, 预可行性研究设计阶段, 枢纽布置曾研究过堆石坝方案和重力拱坝方案。堆石坝方案, 由于河谷狭窄、水头高、泄洪流量大、泄水建筑物布置困难、工程量大、投资多与工期长, 在预可行性研究设计中未被推荐。重力拱坝方案, 由于坝体混凝土量达 1000 万 m^3 , 工程量过大予以放弃。还布置过双曲拱坝坝后厂房方案, 因河床窄、布置困难、施工干扰大、工期长等原因也被否定。

1992 年 4 月, 能源部会同云南省人民政府对小湾水电站预可行性研究报告进行了审查。审查意见同意设计推荐的枢纽布置方案: 在河床布置混凝土双曲拱坝, 利用坝身孔口和岸边隧洞泄洪及地下厂房发电。

可行性研究设计阶段配合坝线的选择, 地下厂房位置的比较, 对泄洪建筑物布置方案进行了比较研究。

根据地形地质条件, 布置了 5 条坝线, 然后以优选坝线为主导, 围绕坝线选择布置泄洪、导流及引水发电建筑物。配合坝线及地下厂房位置选择, 研究了坝身泄洪及左右岸泄洪洞 (或坝肩滑雪式溢洪道) 联合泄洪, 共组合成 10 个布置方案。经过初步比选, 又选出 4 个有代表性方案进行深入设计研究。



中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院（以下简称昆明设计院）对 4 个布置方案进行了技术经济比较，从地形地质条件、岩体质量、水工枢纽布置合理性、分散泄洪消能、运行调度灵活性、施工条件、工期和投资等因素综合考虑，选定Ⅱ坝线右岸地下厂房布置方案。

泄洪消能布置是在坝身分层设置表孔、中孔，多股射流在空中碰撞消能，坝后设置二道坝形成水垫塘，射流落入水垫塘后进一步消能；左岸布置泄洪隧洞分流，与坝身泄水孔组成联合泄洪消能体系，两条导流洞也布置在左岸。右岸布置引水发电系统及地下厂房。可行性研究设计阶段枢纽布置见第 4 章。

第2章 高拱坝泄洪消能布置与运行情况

2.1 国内外高拱坝泄洪消能布置综述

根据搜集到的资料,国内外部分已建或在建的高双曲拱坝与重力拱坝的最大坝高、下泄流量和泄水建筑物布置如表 2.1 所示。从表中可以看出,全部采用坝身孔口泄洪的双曲拱坝有英古里、姆拉丁其、摩西罗克、卡博拉巴萨、卡里巴和我国的拉西瓦。全部采用坝身表孔泄洪的双曲拱坝有美国的摩西罗克,坝高 184m,设 4 个 $13.0\text{m}\times 15.2\text{m}$ 表孔,最大泄洪流量 $7800\text{m}^3/\text{s}$ 。前苏联的英古里拱坝坝高仅次于小湾拱坝达 272m,设 12 个每孔净宽 3.5m 的表孔,泄洪前缘总宽度超过 100m,但最大泄洪流量仅 $2200\text{m}^3/\text{s}$,坝身还设有 7 个深孔,孔管直径 5m,出口处直径缩至 4.35m,是将来抽水蓄能电站的深式进水口,其中 4 个孔作为施工期导流用。重力拱坝采用表孔的有土耳其的卡拉卡亚,坝高 180m,设 10 个 $14.0\text{m}\times 14.0\text{m}$ 表孔,下接厂房顶溢流面,最大泄洪流量 $17000\text{m}^3/\text{s}$ 。全部采用坝身中孔泄洪的双曲拱坝有赞比亚的卡里巴坝,坝高 128m,设 6 个 $8.5\text{m}\times 9.1\text{m}$ 中孔,最大泄洪流量 $9400\text{m}^3/\text{s}$ 。莫桑比克的卡博拉巴萨,坝高 171m,设 8 个 $6.0\text{m}\times 7.8\text{m}$ 中孔,中孔泄洪流量 $13100\text{m}^3/\text{s}$,另设一个 $12.0\text{m}\times 5.1\text{m}$ 表孔,泄洪流量 $350\text{m}^3/\text{s}$,总泄洪流量 $13450\text{m}^3/\text{s}$ 。重力拱坝采用中孔泄洪有前苏联萨扬-舒申斯克,最大坝高 242m,设 11 个 $6.0\text{m}\times 8.2\text{m}$ 中孔,最大泄洪流量 $12980\text{m}^3/\text{s}$,底流衔接消能,现在右岸增设了补充溢洪道,设计流量 $4000\text{m}^3/\text{s}$ 。采用岸边溢洪道和隧洞联合泄洪的双曲拱坝有我国的东江,坝高 157m,最大流量 $7830\text{m}^3/\text{s}$,设 3 孔 $10.0\text{m}\times 7.5\text{m}$ 滑雪式溢洪道,1 条孔口尺寸 $12.0\text{m}\times 10.0\text{m}$ 泄洪洞和 1 条孔口尺寸 $6.4\text{m}\times 7.5\text{m}$ 泄洪洞。全部采用泄洪洞的双曲拱坝有伊朗的迪兹,最大坝高 203m,在左岸不同高程设 2 条竖井式泄洪洞,竖井深 100m 与 80m,分别与直径 14.0m 和 12.6m、长度 400m 的隧洞相连接,设计总泄洪流量 $5900\text{m}^3/\text{s}$ 。重力拱坝有美国的胡佛坝和格林峡坝,坝高 222m 和 220m,前者设 2 条直径 15.2m 溢洪洞,后者设 2 条直径 12.5m 溢洪洞,最大泄洪流量分别为 $11300\text{m}^3/\text{s}$ 和 $8400\text{m}^3/\text{s}$,均由导流洞改建。也有不少工程尤其是高水头大流量工程,通常采用坝身泄洪与岸边溢洪道及隧洞泄洪相结合的模式,如我国东风、二滩、构皮滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级等水电站。上述例子表明,究竟采用何种泄水建筑物合适,需结合工程地形地质条件、水力学指标、导流形式等具体情况,从运行安全可靠、节省投资、施工干扰少、直线工期短、技术合理等综合指标确定。

表 2.2 是国内外部分已建双曲拱坝通过坝身泄洪的例子,有的采用表孔,有的采用中孔,或两者兼有之。通常都采用挑跌流相结合的形式与下游尾水衔接,有的建二道坝、尾坎或利用下游围堰形成水垫塘消能。有的坝后不建二道坝,水流直接射入下游河床水垫并通过水跃消能,直至形成足够的水垫深度使河床达到冲淤平衡。水垫塘有全衬护和不衬护



(有的预挖), 或部分衬护, 如护脚不护底。所以, 水流消能形式也是根据安全可靠、技术经济合理的原则, 结合工程的地形地质条件及水文特性、规模与重要性、水库调蓄能力、运用和环保要求等主要因素确定的, 难有统一的布置模式。表 2.1 中所列工程除卡里巴双曲拱坝下游河床遭严重冲刷外, 尚未见运行后遭严重破坏的报道。

表 2.1 国内外部分高拱坝泄水建筑物布置和最大泄洪流量

序号	工程名称	坝型	坝高(m)	最大泄洪流量(m^3/s)	泄洪建筑物布置 (宽 $\times$ 高: $\text{m}\times\text{m}$, ϕ : m , b : m)				
					坝身表孔 (孔—宽 $\times$ 高)	坝身中孔 (孔—宽 $\times$ 高)	坝身底孔 (孔—宽 $\times$ 高)	溢洪道 (孔—宽 $\times$ 高)	泄洪洞 (条—宽 $\times$ 高)
1	锦屏一级	VA	305	15400	4—11.0 $\times$ 12.0	5—5.0 $\times$ 6.0	2—放空孔		1—12.0 $\times$ 14.0
2	小湾	VA	294.5	20745	5—11.0 $\times$ 15.0	6—6.0 $\times$ 6.5	2—放空孔		1—13.0 $\times$ 13.5
3	溪洛渡	VA	284.5	52300	7—12.5 $\times$ 18.0	8—5.0 $\times$ 8.0	10—导流孔		5—14.0 $\times$ 12.0
4	英古里	VA	272	2200	12— $b=3.5$				
5	拉西瓦	VA	250	6000	3—13.0 $\times$ 14.0	2—4.0 $\times$ 4.09			
6	二滩	VA	240	23900	7—11.0 $\times$ 11.5	6—6.0 $\times$ 5.0	4—导流孔		2—13.0 $\times$ 13.5
7	契尔盖	VA	236	2900					1条
8	埃尔卡洪	VA	234	5900	4— $b=15.0$	3— $\phi 4.8$			1— $\phi 12.0$
9	构皮滩	VA	225	6950	6—16.0 $\times$ 15.0	7—6.0 $\times$ 7.0	2— $\phi 2$		
10	姆拉丁其	VA	220	2200	3—13.0 $\times$ 15.0	3— $\phi 2.5$			
11	卡伦Ⅲ	VA	205	12300		4—6.0 $\times$ 7.0		3—15.0 $\times$ 16.0	
12	迪兹	VA	203	5900					2— $\phi 12.6/14.0$
13	伯科	VA	201	7500	4— $b=11.5$		2—2.75 $\times$ 4.0		2—10.0 $\times$ 10.0
14	卡比尔	VA	200	16200				3—15.2 $\times$ 20.0	
15	摩西罗克	VA	184	7800	4—13.0 $\times$ 15.2				
16	卡博拉巴萨	VA	171	13100	1—6.0 $\times$ 15.5	8—6.0 $\times$ 7.8			
17	东风	VA	168	14200	3—11.0 $\times$ 7.0	5—6.0 $\times$ 6.5		1—15.0 $\times$ 9.5	1—12.0 $\times$ 17.5
18	东江	VA	157	7830				3—10.0 $\times$ 7.5	1—12.0 $\times$ 10.0 1—6.4 $\times$ 7.5
19	卡里巴	VA	128	9400		6—8.5 $\times$ 9.1			
20	里·罗克西	VA	107	21500	15孔 (泄洪流量 13000 m^3/s)			4—15.0 $\times$ 9.0 (泄洪流量 8500 m^3/s)	
21	萨扬-舒申斯克	GA	242	12980		11—6.0 $\times$ 8.2		现右岸已增设最大泄洪流量 4000 m^3/s 的补充溢洪道	
22	胡佛	GA	222	11300					2— $\phi 15.2$
23	格林峡	GA	216.4	8400			2— $\phi 2.45$		2— $\phi 12.5$
24	卡拉卡亚	GA	180	17000	10—14.0 $\times$ 14.0				

注 VA—双曲拱坝; GA—重力拱坝。



表 2.2 国内外部分已建和在建双拱坝坝身泄洪的水力学指标

序号	工程名称	坝高 (m)	最大泄洪流量 最大落差 $\left(\frac{m^3/s}{m}\right)$	泄洪建筑物				坝后消能方式				基岩 岩性	
				泄洪流量 孔—宽×高 $\left(\frac{m^3/s}{m \times m}\right)$			坝身 泄洪 功率 (MW)	泄洪洞 或 溢洪道 $\left(\frac{m^3/s}{m}\right)$	水垫塘与二道坝				
				表孔	中孔	底孔			水垫深 塘长 $\left(\frac{m}{m}\right)$	衬护情况	二道坝		说明
1	英古里	272	$\frac{2200}{230}$	$\frac{2200}{12-3.5 \times 10.0}$	7— ϕ 5.0 抽水蓄能用		4960		$\frac{41.8}{270}$	塘底衬砌 厚度 4m	不 详	反拱型 消力塘	白云岩 石灰岩
2	二滩	240	$\frac{23900}{166.3}$	$\frac{9600}{7-11.0 \times 11.5}$	$\frac{6700}{6-6.0 \times 5.0}$		26500	$\frac{7600}{2-13.0 \times 13.5}$	$\frac{42}{330}$	塘底衬砌 厚度 3m	二道坝 高 32m	平底型 消力塘	正长岩
3	埃尔 卡洪	234	$\frac{5900}{184}$	$\frac{2000}{4-b=15}$	$\frac{1900}{3-\phi 4.8}$		7030	$\frac{2000}{1-\phi 12.0}$		不衬砌	下游 围堰		石灰岩 白云岩
4	姆拉 丁其	220	$\frac{2283}{175}$	$\frac{1670}{3-13.0 \times 5.0}$	$\frac{373}{3-\phi 2.5}$	$\frac{240}{2-\phi 2.0}$	3970		$\frac{20 \sim 31}{130.5}$	底与边坡 衬砌厚 2m	阶梯 尾坎		石灰岩
5	伯科	201	$\frac{7715}{190}$	$\frac{2000}{4-11.5 \times 7.5}$		$\frac{215}{2-\phi 2.5}$	4120	$\frac{5500}{2-\phi 12.0}$	$\frac{41}{200}$	塘底 不衬砌	47.5m 高拱坝	坝后衬砌 厚 2.5m	石灰岩
6	卡兹	185	$\frac{6250}{143}$	$\frac{6250}{10-b=15.9}$		1 孔	8760		$\frac{18}{216}$	不衬砌	高 17m 拱坝		玄武岩 厚 0.5~10m
7	摩西 罗克	184	$\frac{7800}{103.6}$	$\frac{7800}{4-13.0 \times 15.2}$			7920		$\frac{73}{74.7}$	底板薄衬 砌岸边抛 石护面	无		上：安山岩 中：玄武岩 下：安山岩
8	大成	181	$\frac{6400}{162.7}$	$\frac{1400}{5-b=11}$	$\frac{1600}{2-5.5 \times 6.5}$	2 个 冲沙孔	4780	$\frac{3400}{\text{左岸泄洪洞}}$	$\frac{40 \sim 55}{-}$	不衬砌	导流 围堰		石灰岩 板岩
9	卡巴拉 · 巴萨	177	$\frac{13100}{102.9}$	$\frac{420}{1-6.0 \times 15.5}$	$\frac{12680}{8-6.0 \times 7.8}$		13210			不衬砌	无	水舌挑距 245~290m	石灰岩状 片麻岩
10	卡里巴	128	$\frac{9400}{85}$		$\frac{9400}{6-8.5 \times 9.1}$		7910	—		坝趾后设 长 35m 短护坦	无	水舌挑距 85~100m 冲深 70m	变质黑云 母片麻岩
11	里· 罗克西	107	$\frac{21500}{70.5}$	$\frac{13000}{5-b=15.0}$			8980	$\frac{\text{岸边溢洪道}}{8500}$ $\frac{4-15.0 \times 9.0}{-}$	$\frac{27}{75}$	衬砌厚 3m 高强锚杆 接缝 50mm 橡皮止水	尾 坎	塘中间低 两边高 表孔设 分流墩	泥岩
12	溪洛渡	284.5	$\frac{49590}{193.7}$	$\frac{17310}{7-12.5 \times 16.0}$	$\frac{12540}{8-5.0 \times 8.0}$		56660	$\frac{19740}{5-14.0 \times 12.0}$	$\frac{76}{400}$	水垫塘衬 砌厚 3m	二道坝 高 40m		玄武岩
13	构皮滩	231	$\frac{26800}{148}$	$\frac{16500}{6-12.0 \times 15.0}$	$\frac{10300}{7-6.0 \times 7.0}$		38870		$\frac{51 \sim 77}{271}$	衬砌厚 3m	二道坝 高 26m		石灰岩
14	拉西瓦	250	$\frac{6000}{209.9}$	$\frac{4500}{3-13.0 \times 14.0}$	$\frac{1500}{2-4.0 \times 6.0}$		12340		$\frac{26 \sim 37}{228}$	有衬护	二道坝 高 22m	反拱型	粗粒花 岗岩
15	锦屏 — 级	305	$\frac{13897}{221.68}$	$\frac{5106}{3-12.5 \times 11.0}$	$\frac{5471}{4-5.5 \times 6.0}$		23000	$\frac{3320}{1-12.0 \times 14.0}$	$\frac{65 \sim 66}{390}$	有衬护	二道坝 高 50m	平底型	卵石混合土 黏质土砾等