

文章编号: 1672-3031(2009)02-0089-07

# 我国高坝泄洪消能研究的最新进展

孙双科

(中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100038)

**摘要:**近些年来,我国一直处于水电开发与建设的高峰期,大量的实际需求促进了高坝泄洪消能技术的发展与进步。本文分4个方面总结了近年来我国在高坝泄洪消能研究方面的最新进展情况:(1)高拱坝坝身泄洪消能;(2)高水头大流量底流消能;(3)高水头大流量溢洪道与泄洪洞的水力学问题;(4)泄洪雾化问题。在总结已有研究成果的基础上,对高坝泄洪消能技术的进一步发展,以及与之相应的环境问题及安全运行管理等提出了若干建议。

**关键词:**高坝;泄洪消能;底流消能;溢洪道;泄洪洞;泄洪雾化

中图分类号:TV68

文献标识码:A

## 1 研究背景

目前世界水能资源开发的重点在亚洲,而亚洲的重点在中国。统计数据显示,2005年世界上各大洲在建水电工程的总装机容量,南美洲占13.0%,非洲占3.4%,欧美发达国家约占5.3%,而亚洲则占78.3%。在亚洲诸国中,我国的水能开发高居首位,以2005年在建的60m高以上大坝为例,我国为117座,远远高于日本的43座、印度的16座。

我国的水能资源得天独厚,位居世界第一,其中水电的理论蕴藏容量为6.94亿kW,技术可开发容量为5.42亿kW,年发电量为2.47万亿kW·h。进入21世纪以来,随着我国能源发展战略的实施和电力体制改革中市场竞争机制的成功引入,大量社会资本涌向水电,我国水电开发开始进入快速发展期,至2004年8月,水电装机已突破1亿kW。根据电力发展规划与“西电东送”的战略目标,到2010年、2020年,我国常规水电装机容量将分别达到1.94亿kW、3.28亿kW。

近年来,我国正在和即将建设三峡、小湾、溪洛渡、向家坝、白鹤滩、锦屏、双江口等一批战略性工程,其规模巨大,工程与社会条件都十分复杂,技术难度很高。来自工程实践方面的技术需求,大大促进了我国高坝泄洪消能技术的发展。从水力学角度看,我国高坝建设普遍存在高水头、大流量、窄河谷的技术特点,而且对于许多大型水电站而言,上述难点往往同时存在,对高坝泄洪消能技术研究提出了很高的要求。近10余年来,我国学者通过不懈努力与大量创造性工作,在高坝泄洪消能技术研究方面取得了许多突破性进展。

本文分4个方面扼要总结了近年来我国在高坝泄洪消能技术方面的最新进展情况:(1)高拱坝坝身泄洪消能;(2)高水头大流量底流消能;(3)高水头大流量溢洪道或泄洪洞的水力学问题;(4)泄洪雾化问题。在总结已有研究成果的基础上,对高坝泄洪消能技术的进一步发展,以及与之相应的环境问题与安全运行管理等问题提出了展望和建议。

## 2 高拱坝坝身泄洪消能

从国内外现状看,高拱坝已成为大型水电站的主选坝型之一。我国目前在建与待建的一批大型水电站,如小湾、溪洛渡、锦屏、白鹤滩、构皮滩、乌东德等,都采用了高拱坝布置方式。

收稿日期:2009-05-01

作者简介:孙双科(1966-),河南南阳人,教授级高级工程师,主要从事水力学研究。E-mail: sunsk@iwlr.com

我国的高拱坝工程,因“窄河谷、高水头、大泄量”泄洪消能问题突出,在泄水建筑物布置上大多采用坝身开孔泄洪与岸边溢洪道或泄洪洞分流的总体布置构架。1998年我国建成的二滩水电站是一座具有里程碑意义的高拱坝工程,其最大坝高242.00m,最大下泄流量 $23\,900\text{m}^3/\text{s}$ ,其中坝身泄量为 $16\,300\text{m}^3/\text{s}$ ,上述技术指标在国内外已建的同类工程中位居前列。为解决坝身泄洪消能的技术难题,通过大量的技术论证与科学研究,最终采用了“坝身表孔与深孔双层泄水孔口布置、下游设水垫塘与二道坝、通过水舌碰撞促进消能、并辅以岸边泄洪洞泄洪”的泄水建筑物布置格局与消能模式,建成后经数年实际泄洪考验,表明是成功的。在此之后的高拱坝工程,大都沿用了上述“二滩模式”。

近年来,随着科研与设计水平的不断提高,高拱坝坝身泄洪规模在二滩水电站基础上又有了大幅提高,如溪洛渡与白鹤滩水电站的坝身最大泄量均已达到 $30\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的世界级水平,坝身泄洪功率也在二滩水电站26560MW的基础上增大了1倍以上,见表1。

对于高拱坝坝身泄洪消能的“二滩模式”而言,溢流表孔出口鼻坎的布置至关重要,为有效控制水垫塘底板最大冲击压强(一般要求不大于 $15\times 9.8\text{kPa}$ ),目前较多采用出射角度不等的大差动布置型式,通过分散挑流水舌的入水能量,达到降低水垫塘底板冲击压强的目的,而采用溢流前缘为舌形的出口鼻坎以及在出口鼻坎上增设分流齿坎也是行之有效的工程措施。

除了上述针对“二滩模式”的有关研究之外,目前正在积极开展如下两方面的研究工作:

(1)非碰撞式坝身泄洪消能布置研究。在“二滩模式”中,表孔与深孔双层水舌之间的碰撞在促进消能的同时,也会使泄洪雾化有所加剧。为此,我国学者在二滩模式的基础上,正在探索进行非碰撞式坝身泄洪模式的研究。如对表孔采用宽尾墩收缩射流、中孔采用窄缝挑流等。

(2)深厚覆盖层条件下高拱坝坝身泄洪消能布置研究。目前,我国西南地区有几座高拱坝工程,如乌东德水电站与松塔水电站等都面临下游覆盖层深厚的技术难题,若仍采用传统的“二滩模式”,则需要修建规模宏大、造价昂贵的水垫塘与二道坝,而实际情况是,由于下游水垫深厚,水垫塘底板能承受的冲击压强已十分有限,而且消能区的水体体积也已足够大,足以耗散下泄能量,此时采用既护坡又护底的大型人工水垫塘与二道坝布置方案,从技术与经济两方面看都欠缺合理性。因此,在确保泄洪安全的前提下,目前正在研究以“护坡不护底、不设二道坝”的天然水垫塘布置方案取代传统的“水垫塘+二道坝”布置方案的可行性。

表1 国内外部分高拱坝的坝身泄洪水力学指标

序号	工程名称	国家	坝高/ m	落差 m	流量/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	泄洪 功率/MW	河槽 宽度/m	基岩 情况	河谷 形态	完建 年份
1	锦屏一级	中国	305.0	225.0	10 074	22 210	枯水期80~100	大理岩	V型	在建
2	小湾	中国	292.0	225.9	16 889	37 390	枯水期80~100	片麻岩	V型	在建
3	白鹤滩	中国	289.0	200.7	30 000	59 006	枯水期50~90	玄武岩	V型	设计
4	溪洛渡	中国	278.0	189.5	31 496	58 490	枯水期70~100	玄武岩	U型	在建
5	英古里	前苏联	272.0	230.0	2 500	5 040	25	白云岩 石灰岩		1982
6	二滩坝身	中国	242.0	166.3	16 300	26 560	枯水期80~100	正长岩	V型	1998
7	埃尔卡洪	洪都拉斯	231.0	184.0	8 590	15 500	100	石灰岩		1985
8	构皮滩	中国	225.0	144.0	27 470	38 760	136	石灰岩砂岩		设计
9	松塔	中国	313.0	211.0	8 325	17 214	95~145	花岗岩	V型	设计

### 3 高水头大流量底流消能技术研究

底流消能是一种传统的消能方式,其具有流态稳定、消能效果好、对地质条件和尾水水位变化适应性较强的优势。但从国内外的运用情况看,底流消能在大型高坝水电工程中所占的份额仍远远低于挑流消能,我国目前大部分在建与待建的大型水电站,如三峡水利枢纽、小湾、龙滩、溪洛渡、糯扎渡、白鹤滩等均采用了以挑流消能为主体的泄洪消能方案。

以往高坝工程中较少采用底流消能主要有经济和技术两方面因素。一方面,底流消能需要修建造价昂贵的底流消力池,工程投资较大;另一方面,由于高坝工程工作水头高,致使消力池临底流速很高,难于保证消力池自身的泄洪安全。

然而,与挑流消能相比,底流消能更能适应地质条件欠佳的坝址,而且底流消能引起的泄洪雾化很小,对周边环境几无影响,尤其在目前人们对高坝泄洪雾化等环境问题日益重视的现状下,底流消能方式具有独特优势。我国近期投入开发的大型水电站如向家坝、官地等都采用了底流消能方式,就是很好的实例。

近年来,我国学者结合向家坝水电站,针对高水头、大流量条件下底流消能技术进行了深入研究,提出了一种新型的跌坎式底流消能工。研究表明,该新型消能工能够有效降低消力池临底流速和脉动压强,保证消力池的运行安全,满足高水头、大单宽流量泄洪水流的消能要求,为底流消能方式应用于高坝建设提供了参考和借鉴。在向家坝水电站相关研究成果的基础上,我国的官地、金安桥等水电站等也相继采用了跌坎型底流消能工的布置形式。

对于跌坎型消力池而言,跌坎高度的合理选定至关重要。但跌坎高度的决定因素较多,与消力池入池单宽流量、入池流速、消力池的长度、尾坎高度、尾坎下游水位等都有关系。表2列出了目前国内外几座大型跌坎型底流消力池的设计与研究资料,从该表可以初步看出,跌坎型消力池的合理跌坎高度与消力池入池水流的  $Fr$  数之间存在比较明显的关系:入池水流的  $Fr$  数越大,所需要的跌坎高度就越低。当然,对这一问题仍需开展进一步的系统研究。

另外,值得指出的是,我国官地水电站还采用了斜边墙底流消力池布置型式。研究表明,这种布置方式能够顺应下游河道的地形条件,减少直立边墙底流消力池的施工难度与工程投资,同时也增大了消能水体体积。

表2 国内外几座大型跌坎型底流消力池一览

工程	最大坝高/m	上游水位/m	消力池底板高程/m	入池单宽流量/ ( $m^3/(s \cdot m)$ )	入池 $Fr$ 数	跌坎高度/m
特里	260.50	835.00	596.00	109.6	12.5	3.50
萨扬舒申斯克	245.00	544.50	318.00	183.7	10.7	4.25~6.00
官地	168.00	1330.80	1188.00	140.8	8.5	6.50
向家坝	161.00	381.90	245.00	225.3	6.4	8.00~9.00

#### 4 高水头大流量溢洪道与泄洪洞水力学问题研究

据不完全统计,截至2005年底,我国30m以上已建与在建大坝共有4860座,其中土石坝2865座,占59%;拱坝728座,占15%。可见,土石坝与拱坝是目前我国高坝工程的主要坝型。

岸边泄洪洞与溢洪道泄洪,是土石坝与高拱坝工程常见的泄水建筑物布置方式。对土石坝工程而言,由于坝身不能过流,岸边溢洪道与泄洪洞是最为关键的泄水建筑物;对高拱坝而言,泄洪洞往往是坝身泄洪设施的重要补充。为了确保高拱坝的运行安全与水垫塘检修,我国高拱坝在水力设计中大都采用了坝身泄洪与岸边泄洪洞并重的设计思路,岸边泄洪洞单独泄洪可以满足宣泄常年洪水的任务。

目前我国已经建成或正在建设一批具有世界水平的土石坝高坝工程,如双江口、糯扎渡、水布垭、瀑布沟、天生桥一级等,其中双江口水电站最大坝高达到312.00m,位居世界前列,其岸边溢洪道最大泄量 $4160m^3/s$ ,最大单宽流量 $260m^3/(s \cdot m)$ ,鼻坎段最大工作水头超过140.00m,上下游最大水位差超过250.00m,是国内外同类工程中的最高水平。国内外一些大型溢洪道的水力指标参见表3。另外,目前我国在溪洛渡、小湾、白鹤滩等大型高拱坝工程的水力设计中,都布置了数量不等的大型泄洪洞,其单洞最大泄量已达 $4000m^3/s$ 左右,最大单宽流量超过 $270m^3/(s \cdot m)$ 。

对于上述高水头大流量的溢洪道与泄洪洞而言,一般都存在如下两方面的水力学技术难题需要认真解决:一是高流速泄槽段的掺气减蚀问题;二是出口鼻坎的体型优化与下游消能防冲问题。

大型溢洪道与泄洪洞,因单宽流量很大,水流  $Fr$  数低,当采用常规的掺气坎布置型式时,往往由于掺气坎下游回溯水流强烈而难以形成稳定而完整的掺气底空腔,从而影响掺气坎的工作效率。针对这一问题,我国学者进行了大量的探索性研究,在传统掺气坎布置型式的基础上,相继提出了U型掺气坎、平面凹型掺气坎、V型掺气坎、变底坡掺气坎等新的掺气坎布置型式,部分研究成果已经得到设计与工程采用。近期,高速泄槽侧壁的掺气减蚀问题也开始成为新的研究热点。

大型岸边溢洪道与泄洪洞的水舌归槽与下游冲刷问题通常都十分复杂,因而对出口鼻坎布置体型有较高的技术要求,尤其是当溢流中心线与下游河道夹角过大时这一问题会更加突出。目前,我国大型溢洪道与泄洪洞较多采用扩散鼻坎或扭曲鼻坎等布置型式,如二滩泄洪洞采用的舌形扩散鼻坎以及瀑布沟溢洪道采用的鹰嘴型鼻坎等都取得了成功。实际上,对于狭窄河谷大型泄洪洞而言,采用窄缝式挑流鼻坎的布置形式,不仅体型简洁,易于施工,而且能够有效控制挑流水舌的入水落点并降低下游河道冲刷,是一种值得重视的鼻坎布置方案。为此,我国学者结合小湾、锦屏等高拱坝大型泄洪洞的水力设计,积极开展了相关研究,目前小湾水电站泄洪洞已确定采用窄缝式出口鼻坎。

值得注意的是,近年来,继国家“95”攻关期间结合溪洛渡水电站研究“龙落尾”泄洪洞取得较大进展之后,在其它一些高水头泄洪洞如锦屏、白鹤滩等大型泄洪洞的水力设计中,也选用了该种布置方式。与以往采用较多的“龙抬头”泄洪洞相比,“龙落尾”泄洪洞由于大部分洞段为有压流动,水流流速低,泄洪安全更易得到保障。而在“龙落尾”陡坡段,虽然水流流速加速快、流速高,但高流速段的长度有限,且易于布置坎下回溯水流较弱、通气情况良好的掺气减蚀设施,从而有助于降低出现空化空蚀的可能性。另一方面,从水力学角度看,“龙抬头”布置也有其有利之处,由于大部分洞段处于高流速区,沿程水头损失较大,因此相对于“龙落尾”而言,挑流鼻坎的水流流速较小,有利于降低消能防冲设计的技术难度。

无论是“龙落尾”还是“龙抬头”都有其各自的优缺点,并不存在孰优孰劣问题,需要根据具体工程的地质地形条件与水力特性灵活选择。

表3 国内外部分大型溢洪道的泄洪规模(按单宽流量排序)

序号	工程	坝高/ m	溢洪道孔口尺寸 (孔数-宽×高)(m×m)	泄量/( $m^3/s$ )		堰顶单宽 流量/( $m^3/(s\cdot m)$ )	泄洪功率 /MW
				总泄量	单孔泄量		
1	天生桥一级	178.0	5-13.0×20.0	21 750	4 350	335	
2	东风	163.0	15.0×21.0	4 220	4 220	281	
3	乌东德(面板堆石坝方案)	172.0	8-15.5×24.0	34 805	4 350	280.7	
4	糯扎渡	261.5	8-15.0×20.0	33 500	4 188	279	
5	水布垭	233.0	5-14.0×21.8	18 280	3 656	261	
6	双江口	312.0	1-16.0×22.0	4 160	4 160	260	
7	鲁布革	103.8	2-13.0×18.0	6 459	3 230	248	
8	墨西哥马尔帕索		3-15.0×18.7	11 100	3 700	247	
9	马来西亚巴贡	205.0	4-15.0 19.0	14 600	3 650	243	23 303
10	巴西图库鲁依	91.5	23-20.0×20.8	104 400	4 539	227	60 500
11	巴西依泰普	196.0	14-20.0×20.3	62 230	4 445	222	77 150
12	龙羊峡	178.0	2-12.0×17.0	8 000	4 000	222	
13	委内瑞拉卡罗尼河古里		9-15.2×20.7	30 000	3 333	219	42 000
14	乌江渡	165.0	3-12.0×17.0	11 840	3 947	201	
15	瀑布沟	186.0	3-12.0×17.0	6 831	2 277	190	
16	哥伦比亚契伏		3-16.0×14.0	9 000	3 000	188	
17	土耳其凯班		6-16.0×24.0	17 000	2 833	177	30 600
18	碧口	101.8	1-15.0×16.0	2 310	2 310	154	

## 5 高坝泄洪雾化问题研究

泄洪雾化是目前水利水电建设中备受关注的热点问题之一。一般而言,泄水建筑物在泄洪时,高速水流都将产生雾化降雨,这种非自然降雨对坝区交通、下游岸坡稳定、电厂输变线路的安全、下游正常的

工农业生产以及附近居民的日常生活等常构成一定的威胁与影响。尤其是高水头、大流量的水电工程,其泄洪雾化的规模与危害十分惊人。如二滩水电站 1999 年泄洪时,强烈的雾化降雨导致下游岸坡的坍塌;白山水电站 1986 年及 1995 年两次开闸泄洪,均在坝下形成较严重的溅水雾化现象,水舌风、暴雨、飞石对水电站的正常运行造成了严重影响。可见泄洪雾化是关系到工程安全的重大研究课题之一。另外,随着人们环保意识的增强,泄洪雾化对环境的影响越来越受到广泛关注。

我国水电界对泄洪雾化问题的研究始于 20 世纪 80 年代,在乌江渡水电站与梅山水电站相继开展了原型观测研究。近年来,在吸收已建工程经验教训的基础上,我国水电界对泄洪雾化问题的重视程度已上升到一个新的高度,目前各大中型待建工程如小湾、溪落渡、向家坝等,大都开展了泄洪雾化预测研究。正确预测泄洪雾化的影响范围及其降雨强度,对于下游岸坡防护设计、重要建筑物防雾廊道的设计,以及合理制订泄水建筑物的运行调度方式等都有重要的指导意义。但泄洪雾化是一个非常复杂的水、气两相流物理现象,其影响因素众多,包括泄水建筑物的体型及泄洪方式、上下游水位差、流量、入水流速与角度、下游水垫深度、下游地形、当地气象条件等都是有关联的影响因素,同时在时间上也有其随机性的一面,因此研究难度很大。

目前国外在该方面的研究报道比较少见,而我国的研究成果则相对较多,这与我国水电工程水头高、流量大、雾化问题更加突出有密切关系。迄今为止,我国对泄洪雾化问题的研究大体上可分为原型观测、模型模拟、理论分析 3 大类。

多年以来,陈惠玲与梁在潮分别致力于泄洪雾化的实体模拟试验与理论计算研究,并取得了较多成果,加深了对泄洪雾化现象及其物理过程的认识与理解,也大大提升了工程界与学术界对高坝泄洪雾化问题的重视程度。尽管如此,由于泄洪雾化问题的独特复杂性,无论是模型试验研究还是理论计算,都存在较多难点与争议,如理论计算因涉及到挑流水舌的掺气、破碎、入水激溅、扩散漂移等十分复杂的物理过程,受认识深度的局限性所制约,计算模型本身不得不做出许多概化与假定;而在采用模型试验时,模型律如何确定也始终未得到完全解决。上述问题直接影响了采用模型试验与理论计算结果的可靠性与准确度,同时也制约了相应的研究成果在实际工程中的应用。基于上述原因,近几年来在水工水力学界,人们又将目光更多转移到已建工程泄洪雾化的原型观测方面,目前基于大量原型观测资料的经验分析方法被公认为是研究雾化问题的一种既切合实际、准确度又较高的方法。实际上,无论是模型试验或是理论计算也必须采用原型观测数据作为检验或率定之用。长期以来,我国在泄洪雾化方面积累了大量的原型观测资料,利用这些资料,进行科学归纳整理和分析,可以得到一些颇具价值的成果。如曾有学者在估算泄洪雾化范围时以坝高作为主要控制参数,建立了雾化纵、横向范围及高度与坝高的经验关系;也有学者认为雾化影响区范围与鼻坎水头之间存在近似的线形关系等。然而上述研究考虑的自变量因素往往是单一的,难以全面正确地反映泄洪雾化复杂的物理机制与影响因素的多样性,从而也直接限制了上述成果在实际中的运用。

近年来,孙双科等基于国内多座已建工程泄洪雾化的原型观测资料,采用统计分析、工程类比、以及人工神经网络预测方法,建立了一套定量预测泄洪雾化影响范围与降雨强度分布的经验公式与基于空间任意坐标点处泄洪雾化降雨强度的人工神经网络预测模型,并在小湾、瀑布沟、双江口、亚碧罗等水电站泄洪雾化预测研究中得到了运用。

## 6 展望与建议

我国目前正处于水电建设高峰期,而且还将持续一段时间,高坝泄洪消能技术研究具有广泛的技术需求和良好的发展前景,围绕一系列的高坝建设,还有大量的研究工作要做,也必将进一步促进高坝泄洪消能技术的进一步发展。在今后的研究工作中,需重视并关注如下问题:

(1) 高坝泄洪消能技术的基础性理论研究亟待加强。从发展历史与现状看,高坝泄洪消能仍然是一门实践性很强的应用性学科,其研究方法目前仍以试验研究为主要技术手段,在解决实际工程问题时,往往需要与已建工程成败的经验教训与研究者的经验积累。尽管如此,同其它学科一样,基础理论方面

的研究依然十分重要。而目前的情况是,大量研究工作往往受限于研究周期与经费,只能立足于解决具体工程的生产实际问题,而缺乏系统而深入的总结归纳与理论分析,致使该学科的基础理论研究相对比较薄弱,且进展缓慢,如高速水流水气两相流理论、空化空蚀理论、岩石冲刷理论、高速水流数值模拟计算理论等在近 20~30 年内国内外都未能取得突破性进展。应当认识到,理论研究与发展的不足,制约了学科的进一步发展。对此应给予高度重视并加大研究力度。

(2) 建议尽快自主开发高速水流数值模拟计算的高水准原创性计算软件。我国学者目前在水工水力学研究中普遍采用国外的 Fluent、StarCD、Mike 等通用性大型商业软件,但上述计算软件在解决与高速水流有关的工程水力学问题时仍存在不少困难,难以解决复杂的工程实际难题,为此需要尽快开发研制出适应高速水流特性的专门计算软件。

(3) 应重视对高坝建设中环境制约因素的研究。当前我国的水电开发已进入生态环境制约的发展阶段,在不断获取建坝效益的同时,人们对大坝建设的环境影响问题日益关注。因此,必须重视大坝建设中的环境影响问题,并积极寻求减免其不利影响的工程措施与非工程措施。仅工程措施而言,与高坝泄洪消能研究相关的包括低雾化泄洪消能技术、泄洪雾化预测、鱼道水力学、分层取水水力学等,均应作为重点研究问题,增大科研投入。

(4) 需关注枢纽安全运行和科学管理问题。在不远的将来,随着我国一大批巨型水电站的不断建成与投产,大坝安全运行与科学管理问题将会日益受到各方面的高度关注。我国已建的一些高坝工程,虽然其规模与技术难度与目前在建中的大型工程相比尚有一定差距,但有的已出现这样或那样的破坏,从抗御风险、确保工程安全的角度出发,应高度重视对巨型水电工程泄洪安全与运行调度方式等的深入研究,包括建立泄洪安全的评价指标体系与分析方法,进一步完善泄水建筑物的水力学安全监测技术等。

(5) 就研究方法而言,通过水力学原型观测研究,可以有效弥补并修正水工模型试验中缩尺因素的影响,从而正确认识泄水建筑物的水力特性并对其安全运行提出合理建议。因此,对水力学原型观测的实施方法、资料的归纳整理与深入分析也是值得重视的研究方向。

## 参 考 文 献:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告——水利科学与海洋工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 潘家铮, 何理 主编. 中国大坝五十年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [3] 彭程主编. 21 世纪中国水电工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [4] 李桂芬主编. 第一届全国水力学与水信息学会议论文集[C]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [5] 李桂芬主编. 第二届全国水力学与水信息学会议论文集[C]. 成都: 四川大学出版社, 2005.
- [6] 李桂芬主编. 第三届全国水力学与水信息学会议论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 2007.
- [7] 童显武, 李桂芬主编. 高水头泄水建筑物收缩式消能工[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] 贾金生, 等. 2005 年中国与世界大坝建设情况[Z]. 中国大坝委员会网页.
- [9] 刘宁, 等主编. 当代水利科技前沿[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 吴持恭. 明渠水气两相流[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989.
- [11] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 倪汉根. 高效消能工[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000.
- [13] 梁在潮. 雾化水流理论[J]. 泄水工程与高速水流, 2000.
- [14] 刘士和. 高速水流[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 许唯临, 等. 高坝泄洪消能研究[C]// 曹楚生, 谢士楞. 新世纪水利工程科技前沿. 天津: 天津大学出版社, 2006.
- [16] 童显武. 中国水工水力学发展综述(1)[J]. 水力发电, 2004, 30(1): 30-67.
- [17] 童显武. 中国水工水力学发展综述(2)[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 69-73.
- [18] 孙永娟, 等. 高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J]. 水力发电, 2005, (8): 70-72.
- [19] 李忠义, 等. 导流洞改建为孔板泄洪洞水力学问题研究[J]. 水利学报, 1997, (2): 2-8.

- [20] 郭军, 等. 大型泄洪洞高速水流的研究进展与风险分析[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1193–1198.
- [21] 刘沛清. 高拱坝下游水垫塘底板稳定性设计[J]. 水利学报, 1999, (2): 5–12.
- [22] 万五一, 等. 溢流孔分流齿坎对水舌形状及水垫塘底板冲击压强的影响[J]. 水利学报, 2007, (5): 552–557.
- [23] 张建民, 等. 水平多股淹没射流理论及试验研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1): 97–102.
- [24] 孙双科, 等. 跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J]. 水利学报, 2005, (10): 1188–1193.
- [25] 孙双科, 刘之平. 泄洪雾化降雨的纵向边界估算[J]. 水利学报, 2003, (12): 53–58.
- [26] 尹进步, 等. 用于大单宽泄洪台阶坝面上的一种新型宽尾墩[J]. 西北水电, 2002, (1): 44–36.
- [27] 尹进步, 等. X型宽尾墩应用与发展的试验研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 36–40.
- [28] 周辉, 陈慧玲. 挑流泄洪雾化降雨的模糊综合评判方法[J]. 水利水运科学研究, 1994, (1): 165–170.
- [29] 陈文学, 等. 龙抬头式泄洪洞反弧末端边墙掺气减蚀设施的研究[J]. 水力发电, 2005, 31(4): 31–34.
- [30] 柳海涛, 等. 泄洪雾化预测的人工神经网络方法探讨[J]. 水利学报, 2005, (10): 1241–1245.
- [31] 夏庆福, 等. 小湾水电站泄洪洞水力学问题试验和数值模拟计算[J]. 水利水电技术, 2005, (10): 12–16.

## Summary of research on flood discharge and energy dissipation of high dams in China

SUN Shuang-ke

(Dept. of Hydraulics, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract** China is now experiencing a fastigium period for hydropower development and dam construction. Many problems come across in practice of dam building have accelerated development and advancement of dam hydraulics. This paper presents a summary comment on research progress in the flood discharge and energy dissipation of high dams in the country. The main content includes four aspects: flood discharge and energy dissipation in high arch dams; energy dissipation by hydraulic jump in stilling basin with high head and large flow rate; spillways and flood tunnels, and atomization due to flood discharging. After reviewing the research achievements, some suggestions for the high-dam flood discharge and energy dissipation are proposed in terms of further development, environmental impacts and operation and supervise of hydraulic structures.

**Key words:** high dam; flood discharge and energy dissipation; hydraulic jump dissipator; spillway; flood tunnels; atomization

(责任编辑: 李福田)