



主 编 周 钟

副主编 杨静熙 张 敬 蔡德文

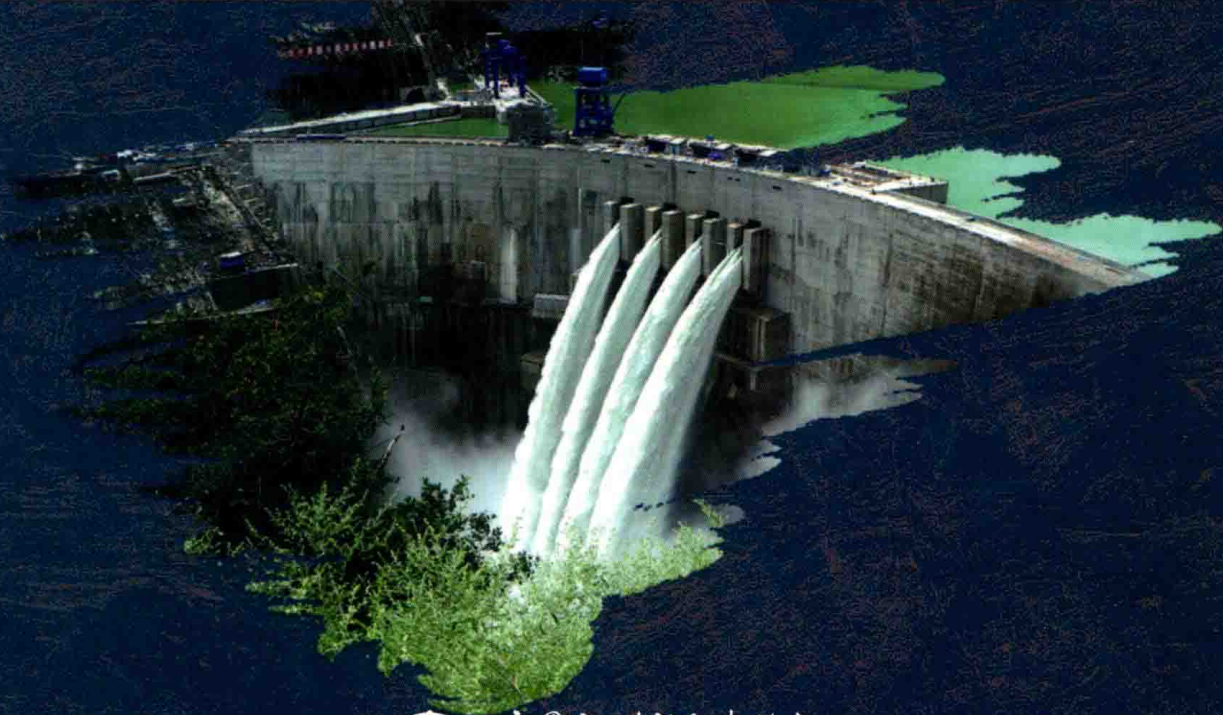
蒋 红 廖成刚 游 湘

大国重器

中国超级水电工程·锦屏卷

窄河谷高拱坝枢纽 泄洪消能关键技术

周钟 许唯临 游湘 张公平 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



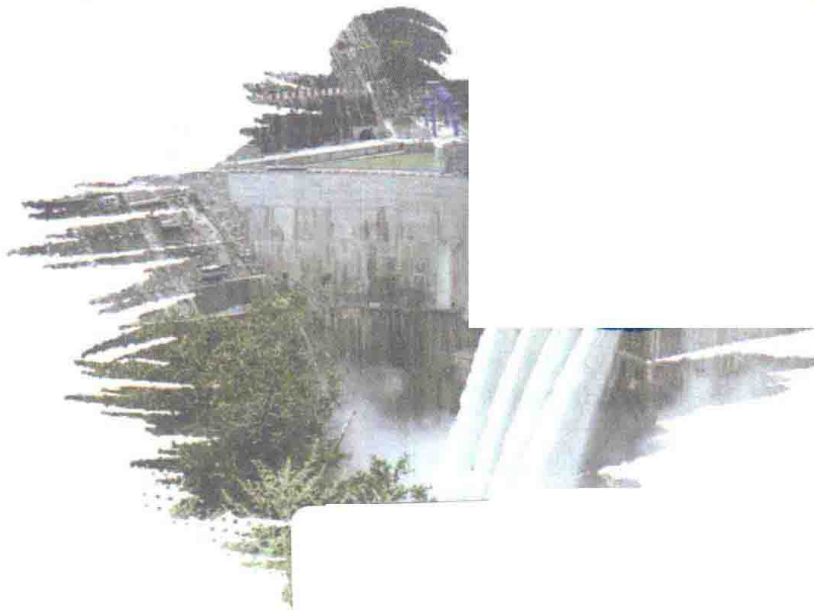
主 编 周 钟
副主编 杨静熙 张 敬 蔡德文
蒋 红 廖成刚 游 湘

大国重器

中国超级水电工程·锦屏卷

窄河谷高拱坝枢纽 泄洪消能关键技术

周钟 许唯临 游湘 张公平 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系国家出版基金项目——《大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷》之《窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术》分册。本书结合坝址区地形地质条件与枢纽建筑物布置特点,采用理论分析、模型试验、原型观测和数值模拟分析相结合的研究方法,分析论述了高拱坝枢纽泄洪消能布置、坝身孔口泄洪消能方式、水垫塘水力特征及结构稳定性、高拱坝坝身泄洪雾化特征与防护的设计,研究总结了泄洪洞布置及基本水力特征、空化特性及掺气减蚀、出口燕尾挑坎水流归槽等关键技术,提出了高拱坝多层孔口无碰撞泄洪消能及泄洪洞出口燕尾式挑流消能等新技术,并对未来的应用前景进行了展望。本书是锦屏一级水电站枢纽泄洪消能设计成功经验和创新成果的系统总结。

本书主要供水利水电工程及相关领域技术人员参考,也可供相关专业的院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术 / 周钟等编著

— 北京:中国水利水电出版社,2022.3

(大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷)

ISBN 978-7-5226-0585-2

I. ①窄… II. ①周… III. ①水电水利工程—拱坝—泄洪消能—研究—凉山彝族自治州 IV. ①TV135.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第052032号

书 名	大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷 窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术 ZHAI HEGU GAO GONGBA SHUNIUXIEHONG XIAONENG GUANJIAN JISHU
作 者	周钟 许唯临 游湘 张公平 等 编著
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@mwr.gov.cn 电话: (010) 68545888 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售有限公司 电话: (010) 68545874、63202643 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	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.5印张 402千字
版 次	2022年3月第1版 2022年3月第1次印刷
定 价	150.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷》 编撰委员会

高级顾问 马洪琪 钟登华 王思敬 许唯临

主任 王仁坤

常务副主任 周 钟

副主任 杨静熙 张 敬 蔡德文 蒋 红
廖成刚 游 湘

委 员 李文纲 赵永刚 郎 建 饶宏玲
唐忠敏 陈秋华 汤雪峰 薛利军
刘 杰 刘忠绪 邢万波 张公平
刘 跃 幸享林 陈晓鹏

主 编 周 钟

副 主 编 杨静熙 张 敬 蔡德文 蒋 红
廖成刚 游 湘

《窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术》

编 撰 人 员

主 编 周 钟

副 主 编 许唯临 游 湘 张公平

参编人员 邓 军 张 旻 唐忠敏 蒙富强

刘善均 刘 跃 杨 敬 鲁 毅

锦绣山河，层峦叠翠。雅砻江发源于巴颜喀拉山南麓，顺横断山脉，一路奔腾，水势跌宕，自北向南汇入金沙江。锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州境内，是雅砻江干流中下游水电开发规划的控制性水库梯级电站，工程规模巨大，是中国的超级水电工程。电站装机容量 3600MW，年发电量 166.2 亿 kW·h，大坝坝高 305.0m，为世界第一高拱坝，水库正常蓄水位 1880.00m，具有年调节功能。工程建设提出“绿色锦屏、生态锦屏、科学锦屏”理念，以发电为主，结合汛期蓄水兼有减轻长江中下游防洪负担的作用，并有改善下游通航、拦沙和保护生态环境等综合效益。锦屏一级、锦屏二级和官地水电站组成的“锦官直流”是西电东送的重点项目，可实现电力资源在全国范围内的优化配置。该电站的建成，改善了库区对外、场内交通条件，完成了移民及配套工程的开发建设，带动了地方能源、矿产和农业资源的开发与发展。

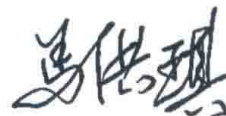
拱坝以其结构合理、体形优美、安全储备高、工程量少而著称，在宽高比小于 3 的狭窄河谷上修建高坝，当地质条件允许时，拱坝往往是首选的坝型。从 20 世纪 50 年代梅山连拱坝建设开始，到 20 世纪末，我国已建成的坝高大于 100m 的混凝土拱坝有 11 座，拱坝数量已占世界拱坝总数的一半，居世界首位。1999 年建成的二滩双曲拱坝，坝高 240m，位居世界第四，标志着我国高拱坝建设已达到国际先进水平。进入 21 世纪，我国水电开发得到了快速发展，目前已建成了一批 300m 级的高拱坝，如小湾（坝高 294.5m）、锦屏一级（坝高 305.0m）、溪洛渡（坝高 285.5m）。这些工程不仅坝高、库大、坝身体积大，而且泄洪功率和装机规模都位列世界前茅，标志着我国高拱坝建设技术已处于国际领先水平。

锦屏一级水电站是最具挑战性的水电工程之一，开发锦屏大河湾是中国几代水电人的梦想。工程具有高山峡谷、高拱坝、高水头、高边坡、高地应

力、深部卸荷等“五高一深”的特点，是“地质条件最复杂，施工环境最恶劣，技术难度最大”的巨型水电工程，创建了世界最高拱坝、最复杂的特高拱坝基础处理、坝身多层孔口无碰撞消能、高地应力低强度比条件下大型地下洞室群变形控制、世界最高变幅的分层取水电站进水口、高山峡谷地区特高拱坝施工总布置等多项世界第一。工程位于雅砻江大河湾深切高山峡谷，地质条件极其复杂，面临场地构造稳定性、深部裂缝对建坝条件的影响、岩体工程地质特性及参数选取、特高拱坝坝基岩体稳定、地下洞室变形破坏等重大工程地质问题。坝基发育有煌斑岩脉及多条断层破碎带，左岸岩体受特定构造和岩性影响，卸载十分强烈，卸载深度较大，深部裂缝发育，给拱坝基础变形控制、加固处理及结构防裂设计等带来前所未有的挑战，对此研究提出了复杂地质拱坝体形优化方法，构建了拱端抗变形系数的坝基加固设计技术，分析评价了边坡长期变形对拱坝结构的影响。围绕极低强度应力比和不良地质体引起的围岩破裂、时效变形等现象，分析了三轴加卸载和流变的岩石特性，揭示了地下厂房围岩渐进破裂演化机制，提出了洞室群围岩变形稳定控制的成套技术。高拱坝泄洪碰撞消能方式，较好地解决了高拱坝泄洪消能的问题，但泄洪雾化危及机电设备与边坡稳定的正常运行，对此研究提出了多层孔口出流、无碰撞消能方式，大幅降低了泄洪雾化对边坡的影响。高水头、高渗压、左岸坝肩高边坡持续变形、复杂地质条件等诸多复杂环境下，安全监控和预警的难度超过了国内外现有工程，对此开展完成了工程施工期、蓄水期和运行期安全监控与平台系统的研究。水电站开发建设的水生生态保护，尤其是锦屏大河湾段水生生态保护意义重大，对此研究阐述了生态水文过程维护、大型水库水温影响与分层取水、鱼类增殖与放流、锦屏大河湾鱼类栖息地保护和梯级电站生态调度等生态环保问题。工程的主要技术研究成果指标达到国际领先水平。锦屏一级水电站设计与科研成果获1项国家技术发明奖、5项国家科技进步奖、16项省部级科技进步奖一等奖或特等奖和12项省部级优秀设计奖一等奖。2016年获“最高的大坝”吉尼斯世界纪录称号，2017年获中国土木工程詹天佑奖，2018年获菲迪克（FIDIC）工程项目杰出奖，2019年获国家优质工程金奖。锦屏一级水电站已安全运行6年，其创新技术成果在大岗山、乌东德、白鹤滩、叶巴滩等水电工程中得到推广应用。在高拱坝建设中，特别是在300m级高拱坝建设中，锦屏一级水电站是一个新的里程碑！

本人作为锦屏一级水电站工程建设特别咨询团专家组组长，经历了工程建设全过程，很高兴看到国家出版基金项目——《大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷》编撰出版。本系列专著总结了锦屏一级水电站重大工程地质问题、复杂地质特高拱坝设计关键技术、地下厂房洞室群围岩破裂及变形控制、窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术、特高拱坝安全监控分析、水生生态保护研究与实践等方面的设计技术与科研成果，研究深入、内容翔实，对于推动我国特高拱坝的建设发展具有重要的理论和实践意义。为此，推荐给广大水电工程设计、施工、管理人员阅读、借鉴和参考。

中国工程院院士



2020年12月

序 二

千里雅江水，高坝展雄姿。雅砻江从青藏高原雪山流出，聚纳众川，切入横断山脉褶皱带的深谷巨壑，以磅礴浩荡之势奔腾而下，在攀西大地的锦屏山大河湾，遇世界第一高坝，形成高峡平湖，它就是锦屏一级水电站工程。在各种坝型中，拱坝充分利用混凝土高抗压强度，以压力拱的型式将水推力传至两岸山体，具有良好的承载与调整能力，能在一定程度上适应复杂地质条件、结构形态和荷载工况的变化；拱坝抗震性能好、工程量少、投资节省，具有较强的超载能力和较好的经济安全性。锦屏一级水电站工程地处深山峡谷，坝基岩体以大理岩为主，左岸高高程为砂板岩，河谷宽高比 1.64，混凝土双曲拱坝是最好的坝型选择。

目前，高拱坝设计和建设技术得到快速发展，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称“成都院”）在 20 世纪末设计并建成了二滩、沙牌高拱坝，二滩拱坝最大坝高 240m，是我国首座突破 200m 的混凝土拱坝，沙牌水电站碾压混凝土拱坝坝高 132m，是当年建成的世界最高碾压混凝土拱坝；在 21 世纪初设计建成了锦屏一级、溪洛渡、大岗山等高拱坝工程，并设计了叶巴滩、孟底沟等高拱坝，其中锦屏一级水电站工程地质条件极其复杂、基础处理难度最大，拱坝坝高世界第一，溪洛渡工程坝身泄洪孔口数量最多、泄洪功率最大、拱坝结构设计难度最大，大岗山工程抗震设防水平加速度达 0.557g，为当今拱坝抗震设计难度最大。成都院在拱坝体形设计、拱坝坝肩抗滑稳定分析、拱坝抗震设计、复杂地质拱坝基础处理设计、枢纽泄洪消能设计、温控防裂设计及三维设计等方面具有成套核心技术，其高拱坝设计技术处于国际领先水平。

锦屏一级水电站拥有世界第一高拱坝，工程地质条件复杂，技术难度高。成都院勇于创新，不懈追求，针对工程关键技术问题，结合现场施工与地质条件，联合国内著名高校及科研机构，开展了大量的施工期科学研究，进行

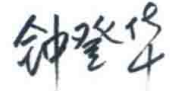
科技攻关，解决了制约工程建设的重大技术难题。国家出版基金项目——《大国重器 中国超级水电工程·锦屏卷》系列专著，系统总结了锦屏一级水电站重大工程地质问题、复杂地质特高拱坝设计关键技术、地下厂房洞室群围岩破裂及变形控制、窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能关键技术、特高拱坝安全监控分析、水生生态保护研究与实践等专业技术难题，研究了左岸深部裂缝对建坝条件的影响，建立了深部卸载影响下的坝基岩体质量分类体系；构建了以拱端抗变形系数为控制的拱坝基础变形稳定分析方法，开展了抗力体基础加固措施设计，提出了拱坝结构的系统防裂设计理念和方法；创新采用围岩稳定耗散能分析方法、围岩破裂扩展分析方法和长期稳定分析方法，揭示了地下厂房围岩渐进破裂演化机制，评价了洞室围岩的长期稳定安全；针对高拱坝的泄洪消能，研究提出了坝身泄洪无碰撞消能减雾技术，研发了超高流速泄洪洞掺气减蚀及燕尾挑坎消能技术；开展完成了高拱坝工作性态安全监控反馈分析与运行期变形、应力性态的安全评价，建立了初期蓄水及运行期特高拱坝工作性态安全监控系统；锦屏一级工程树立“生态优先、确保底线”的环保意识，坚持“人与自然和谐共生”的全社会共识，协调水电开发和生态保护之间的关系，谋划生态优化调度、长期跟踪监测和动态化调整的对策措施，解决了大幅消落水库及大河湾河道水生生物保护的难题，积极推动了生态环保的持续发展。这些为锦屏一级工程的成功建设提供了技术保障。

锦屏一级水电站地处高山峡谷地区，地形陡峻、河谷深切、断层发育、地应力高，场地空间有限，社会资源匮乏。在可行性研究阶段，本人带领天津大学团队结合锦屏一级工程，开展了“水利水电工程地质建模与分析关键技术”的研发工作，项目围绕重大水利水电工程设计与建设，对复杂地质体、大信息量、实时分析及其快速反馈更新等工程技术问题，开展水利水电工程地质建模与理论分析方法的研究，提出了耦合多源数据的水利水电工程地质三维统一建模技术，该项成果获得国家科技进步奖二等奖；施工期又开展了“高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统”研究，研发了大坝施工信息动态采集系统、高拱坝混凝土施工进度实时控制系统、高拱坝混凝土施工综合信息集成系统，建立了质量动态实时控制及预警机制，使大坝建设质量和进度始终处于受控状态，为工程高效、优质建设提供了技术支持。本人多次到过工程建设现场，回忆起来历历在目，今天看到锦屏一级水电站的成功建设，深感工程建设的艰辛，点赞工程取得的巨大成就。

本系列专著是成都院设计人员对锦屏一级水电站的设计研究与工程实践的系统总结，是一套系统的、多专业的工程技术专著。相信本系列专著的出版，将会为广大水电工程技术人员提供有益的帮助，共同为水电工程事业的发展作出新的贡献。

欣然作序，向广大读者推荐。

中国工程院院士



2020年12月

前言

我国西部高山峡谷地区水电工程持续开发，工程规模巨大，大坝高度达到 300m 级，枢纽泄洪消能技术难度不断增大。高拱坝常采用挑、跌流的泄洪消能方式，表、深孔分层出流，上、下水舌空中碰撞，水垫塘消能，可有效削弱入水射流的集中强度，减轻水垫塘的消能负担，具有水流冲击小、消能效果好的显著特点，在二滩、小湾、溪洛渡、构皮滩等高拱坝工程被广泛应用。近年来二滩等高拱坝工程的运行实践表明，碰撞消能方式能较好地解决高拱坝泄洪消能的问题，但泄洪雾化危及电厂及机电设备的正常运行，影响大坝下游雾化区边坡的安全稳定。同时，由于枢纽泄洪流量大，泄洪隧洞工程增多，其规模与流速也在不断增加，超 50m/s 量级高速水流的泄洪控制、出口消能、空化空蚀问题越来越突出，制约工程成败，影响工程的安全运行。因此，需要对窄河谷、复杂地质条件水电站高拱坝枢纽工程开展高拱坝坝身泄洪消能方式的深入研究，处理好泄洪、消能和雾化的相关关系，降低表、深孔联合泄洪时的雾化影响，研究总结高水头大流量泄洪洞带来的高速水力学问题，这对水电工程开发建设是非常必要的，也具有重要意义。

锦屏一级水电站枢纽泄洪设施由坝身 4 个表孔、5 个深孔、2 个放空底孔、坝后水垫塘以及右岸 1 条有压接无压泄洪洞组成。工程地处深山峡谷，地质条件复杂，左岸雾化区断层带及深部裂缝发育，河谷水面宽度仅 60m；大坝最大高度为 305m，为世界第一高拱坝，校核洪水流量为 $15400\text{m}^3/\text{s}$ ；泄洪洞上下游水位差为 240m、洞内最大流速约 52m/s；坝身泄洪消能、雾化防护、泄洪洞的空化空蚀、水流归槽等问题相当突出。为此，结合工程需求，采用模型试验、数值分析、工程原观对比等多种方法，开展了特高拱坝枢纽泄洪消能与减雾关键技术的专题研究，取得了丰富的研究成果。2013 年 8 月，工程首批机组运行发电，经历了多个洪水期和正常蓄水位泄洪的考验，并于 2014 年、2015 年开展了原型观测，成果表明枢纽泄洪消能建筑物及两岸雾化区边

坡运行情况良好，这充分验证了锦屏一级窄河谷高拱坝坝身表、深孔水舌无碰撞泄洪消能方式及高流速泄洪洞设计的创新理念、方法和措施的合理性。

本书依据工程设计、科研和原观成果，系统总结了窄河谷高拱坝枢纽泄洪消能设计的关键技术。全书分为9章，第1章简述国内外高拱坝枢纽工程泄洪消能的技术现状及主要问题；第2章结合工程条件，拟定泄洪消能建筑物的布置原则，分析论证布置方案，提出泄洪消能的关键技术问题；第3章采用理论分析、模型试验、数值模拟等方法，创新提出坝身多层孔口无碰撞泄洪消能技术；第4章论述水垫塘的消能机理及水力特征，通过水弹性模型试验及理论计算，研究水垫塘的稳定性；第5章重点分析泄洪雾化形成机理及特征，预测并提出泄洪雾化的范围与防护措施；第6章根据泄洪洞的布置条件，研究有压接无压泄洪洞的基本水力特性，提出进口、有压洞、无压洞各段合理的布置及体型设计；第7章对超高流速泄洪洞可能的空化风险，分析泄洪洞的空化特性，研究提出相应的掺气减蚀措施；第8章分析泄洪洞出口消能的难点，比较多种出口挑坎型式，首次提出燕尾式挑流消能设计新技术；第9章总结枢纽泄洪消能的主要成果，提出高坝泄洪消能技术需关注与思考的问题。

本书第1章由游湘、周钟编写，第2章由游湘、周钟、张公平编写，第3章由周钟、张公平、许唯临、唐忠敏编写，第4章由张公平、周钟、刘善均编写，第5章由张公平、许唯临、周钟编写，第6章由游湘、邓军、刘跃、张旻编写，第7章由许唯临、游湘、蒙富强、杨敬编写，第8章由游湘、邓军、张旻、鲁毅编写，第9章由周钟编写。全书由周钟负责组织策划与审定，由肖白云教授级高级工程师审稿，由游湘、张旻统稿，张旻、张公平负责图表绘制。

本书总结、凝练了锦屏一级水电站可行性研究、招标施工图设计阶段完成的各项设计和专题科研成果，参与的科研单位有四川大学、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、天津大学等国内著名高校及科研机构，锦屏一级水电站施工期科研项目由雅砻江流域水电开发有限公司资助，各项成果的形成得到各级主管部门、水电水利规划设计总院以及电站建设单位雅砻江流域水电开发有限公司的大力支持和帮助，在此谨对以上单位表示诚挚的感谢！

本书在编写过程中得到了中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司各

级领导和同事的大力支持与帮助，中国水利水电出版社为本书的出版付出了诸多辛劳，在此一并表示衷心感谢！

限于作者水平，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2020年12月

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 泄洪消能建筑物布置及关键技术	5
2.1 泄洪消能建筑物布置条件	6
2.2 泄洪消能建筑物布置原则	7
2.3 泄洪消能建筑物布置方案	9
2.3.1 泄洪消能建筑物布置方案拟定及分析	9
2.3.2 泄洪消能建筑物布置格局	16
2.4 泄洪消能关键技术问题	18
第 3 章 狭窄河谷高拱坝坝身泄洪消能方式	19
3.1 坝身泄洪消能面临的主要难题	20
3.2 坝身泄洪消能研究方法	20
3.2.1 理论分析计算方法	20
3.2.2 水力学模型试验方法	21
3.2.3 数值模拟方法	23
3.3 坝身孔口泄洪消能方式	24
3.3.1 坝身泄洪水舌碰撞方式	24
3.3.2 坝身泄洪水舌无碰撞方式	28
3.3.3 坝身泄洪消能方式选择	31
3.4 无碰撞方式表孔体型研究	31
3.4.1 收缩式坝身孔口泄洪水舌理论分析	31
3.4.2 无碰撞方式表孔体型	36
3.5 无碰撞方式深孔体型研究	46
3.5.1 深孔布置	46
3.5.2 深孔出口体型	47
3.6 无碰撞方式表、深孔联合泄洪消能试验	55

3.6.1	试验工况	55
3.6.2	泄洪水舌特征及水垫塘水力特性	56
3.6.3	综合评价	57
第4章	水垫塘水力特征及稳定性研究	59
4.1	水垫塘的主要技术难题	60
4.2	水垫塘消能机理与水力特征	60
4.2.1	水垫塘消能机理	60
4.2.2	水垫塘水力特征	61
4.3	水垫塘结构布置	69
4.3.1	水垫塘结构型式	69
4.3.2	水垫塘、二道坝相关参数的确定	70
4.3.3	水垫塘、二道坝结构布置	72
4.3.4	水垫塘运行维护方式	72
4.4	水垫塘结构稳定性分析	73
4.4.1	水垫塘底板稳定机理	73
4.4.2	水弹性模型试验方法水垫塘稳定性评价	74
4.4.3	常规方法水垫塘稳定性评价	76
4.5	坝身泄洪消能原型观测成果分析	77
4.5.1	原型观测工况及仪器布置	77
4.5.2	表、深孔水舌形态	77
4.5.3	水垫塘、二道坝原型观测成果	79
4.5.4	原型观测与模型试验成果对比	81
第5章	高坝坝身泄洪雾化特征及防护措施	85
5.1	高坝坝身泄洪雾化影响及面临的主要问题	86
5.1.1	泄洪雾化对工程的影响	86
5.1.2	锦屏一级高拱坝泄洪雾化面临的主要技术难题	87
5.2	泄洪雾化的研究方法	87
5.2.1	泄洪雾化形成机理	87
5.2.2	泄洪雾化模型试验	88
5.2.3	数值模拟	88
5.2.4	原型观测及工程类比	89
5.3	泄洪雾化特征分析	90
5.3.1	泄洪雾化模型及试验工况	90
5.3.2	碰撞方式泄洪雾化特征分析	91
5.3.3	无碰撞方式泄洪雾化特征分析	95
5.3.4	泄洪雾化差异分析	99
5.4	泄洪雾化预测	101

5.4.1	工程类比	101
5.4.2	泄洪雾化影响范围预测成果	103
5.5	泄洪雾化防护	105
5.5.1	泄洪水雾化的分区与分级	105
5.5.2	泄洪水雾化的防护措施	106
5.6	泄洪水雾化的原型观测成果分析	108
5.6.1	泄洪水雾化原型观测试验概况	108
5.6.2	泄洪水雾化原型观测成果	109
第6章	泄洪洞布置及基本水力特征分析	113
6.1	泄洪洞布置研究	114
6.1.1	泄洪洞基本条件及布置原则	114
6.1.2	泄洪洞总体布置型式	114
6.1.3	泄洪洞布置及体型设计的关键水力学问题	117
6.2	泄洪洞进口水力设计	118
6.2.1	进口基本条件及布置情况	118
6.2.2	进口淹没水深分析	118
6.2.3	进口消涡研究	120
6.3	有压段水力特性	121
6.3.1	弯段水力特性	121
6.3.2	转弯参数选择	122
6.4	龙落尾段基本体型及水力特性	126
6.4.1	渥奇段体型及水力特性	126
6.4.2	斜坡段坡度研究	130
6.4.3	反弧段体型及水力特性	130
6.4.4	锦屏一级龙落尾体型试验验证	133
6.5	流速 50m/s 量级泄洪洞洞顶余幅研究	134
6.5.1	表面自掺气机理	135
6.5.2	掺气水流的结构	139
6.5.3	掺气水深计算分析	141
6.5.4	洞顶余幅分析	145
6.6	原型观测成果分析	146
6.6.1	泄洪洞进口流态及泄流能力	146
6.6.2	泄洪洞压力及流速原型观测	147
6.6.3	30~50m/s 流速量级无压泄洪洞掺气水深原型观测	155
第7章	超高流速泄洪洞空化特性及掺气减蚀措施	159
7.1	锦屏一级泄洪洞空化空蚀问题	160
7.1.1	空化与空蚀机理	160