

锦屏
一级

锦屏一级水电站 特高拱坝工程施工技术

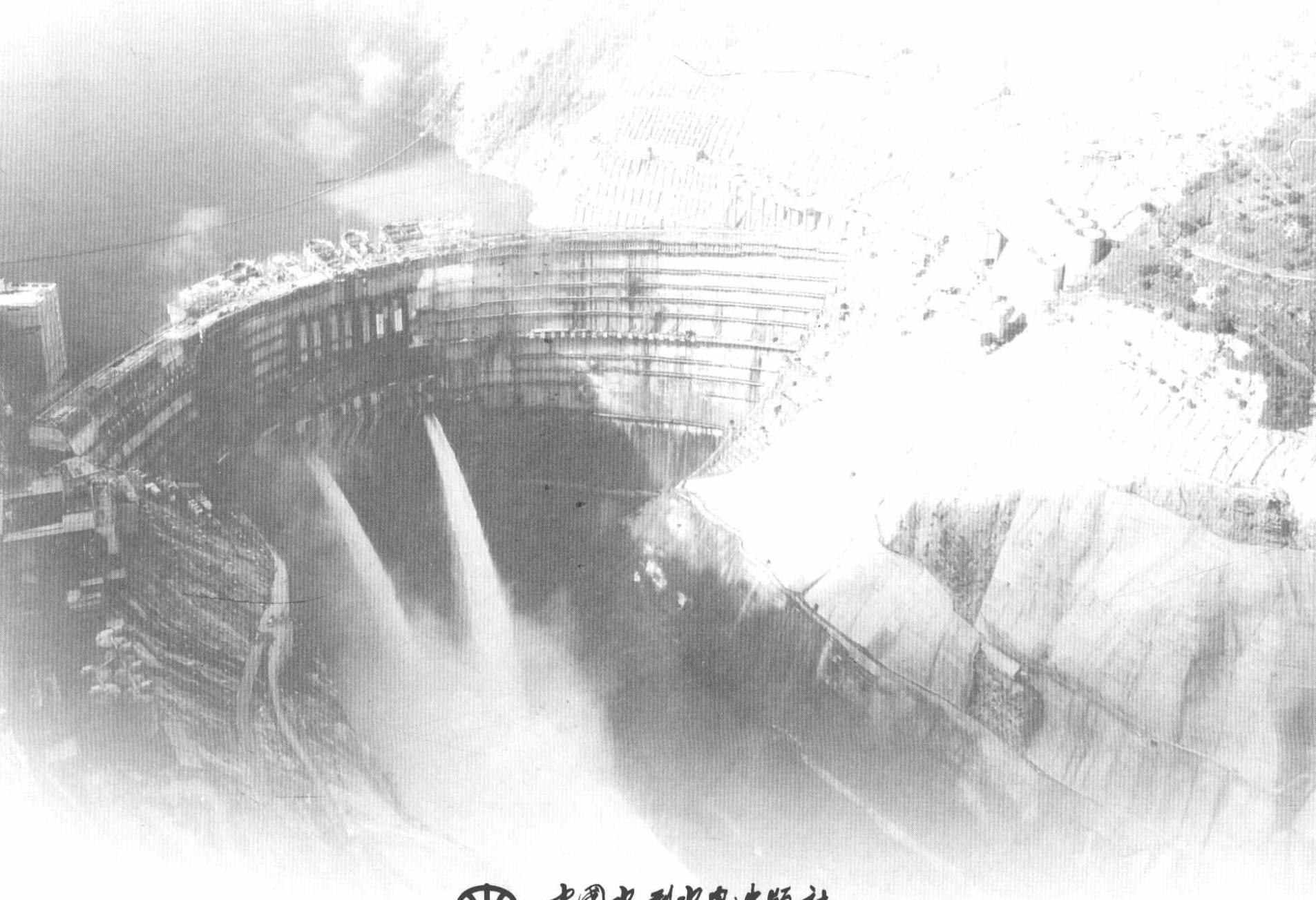
申茂夏 郗举科 米清文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

锦屏一级水电站 特高拱坝工程施工技术

申茂夏 郗举科 米清文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

锦屏一级水电站混凝土双曲拱坝坝高 305m，是世界上在建和已建的最高拱坝，是国家“西部大开发重要标志性工程”和“西电东送”的骨干工程。本书围绕拱坝工程全面总结了锦屏特高拱坝施工过程和施工技术研发与创新，叙述了与拱坝工程相关的工程技术内容和技术成果，其中的困难问题的应对之策及反思，具有较高的借鉴价值。

本书可供水利水电工程技术人员参考，也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目（C I P）数据

锦屏一级水电站特高拱坝工程施工技术 / 申茂夏, 郝举科, 米清文著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5170-3407-0

I. ①锦… II. ①申… ②郝… ③米… III. ①水力发电站—混凝土坝—双曲拱坝—工程施工—锦屏县 IV. ①TV642. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第153878号

书 名	锦屏一级水电站特高拱坝工程施工技术
作 者	申茂夏 郝举科 米清文 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 28. 75 印张 688 千字 4 插页
版 次	2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	110. 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

《锦屏一级水电站特高拱坝工程施工技术》

编写委员会

主 任 申茂夏

副主任 郝举科 向 建

编 委 魏 平 米清文 赵胜利 殷本林 李正兵

郭 益 廖 军 张建军

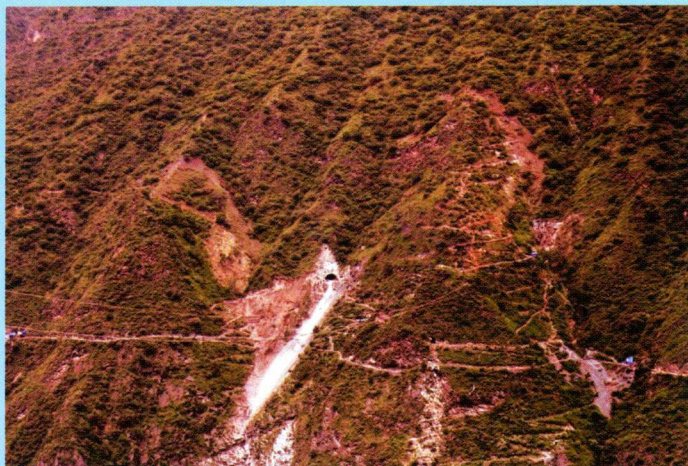
撰 写 米清文 常耀华 武三宝 殷本林 黄 平

刘明生 张宏伦 胡建军 汤 荣 李永义

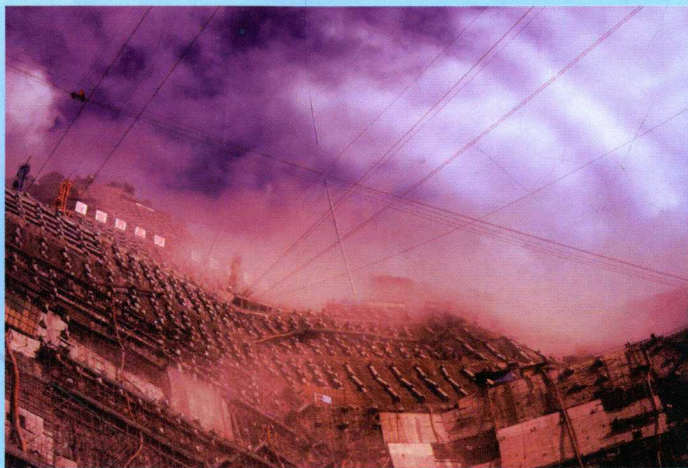
吴应中 尹晓鸽



大坝表孔泄洪场景



左岸坝肩原始地貌



左岸高边坡系统支护



左岸边坡开挖支护全景



崛起中的锦屏大坝



基坑会战



基坑清基

前 言

锦屏一级水电站工程包括了左岸高边坡、左岸 1~13 号大坝和左岸基础处理工程，是锦屏水电工程中极具挑战性的建设部分。左岸高边坡高达 540m，地质条件复杂，锚固工程量浩大，在国内水电工程中极具代表性；高 305m 的混凝土双曲拱坝是目前世界上已建成的最高拱坝，施工速度国内领先；而左岸基础处理工程则集地基处理技术之大成，其复杂程度和工程量在国内水电工程中也是首屈一指。锦屏一级水电站工程的成功建设体现了我国高拱坝的最高施工技术水平，反映了我国特高拱坝施工技术的最新成果和施工成就。

本书全面地总结了锦屏一级水电站特高拱坝工程施工技术的基本经验，内容不仅有高 305m 拱坝的施工技术，高达 540m 的边坡开挖、支护施工技术和左岸基础处理工程施工技术，也包括了工程施工过程、相关技术指标，施工过程中的质量、安全控制以及联合高校展开施工技术专题研究所取得的成果和对工程施工过程的总结、思考，其内容丰富翔实、突出重点、真实客观。

本书分为 12 章，其中，第 1 章是对我国高拱坝建设概况及施工技术的宏观了解、认识，第 2 章是对左岸工程情况的基本介绍，第 3~第 12 章是工程技术回顾、总结。鉴于作者的视角和所掌握资料的局限，以及编者水平所限，本书难免有疏漏和不当之处，衷心希望读者给予指正，也希望本书能成为广大同行和相关人员的他山之石，以资借鉴。

编 者

2015 年 3 月

目 录

前言

1 我国高拱坝建设概况	1
1.1 我国高拱坝建设概况	1
1.2 我国高拱坝的发展趋势及特点	3
1.3 高拱坝施工关键技术现状	6
参考文献	15
2 工程概况	17
2.1 枢纽总布置及主要建筑物	17
2.2 工程水文气象	31
2.3 基本地质条件	34
2.4 工程施工条件	36
2.5 左岸工程简介	38
2.6 左岸工程施工总体情况	42
3 施工总体布置	55
3.1 施工交通布置	55
3.2 生活营地布置	61
3.3 辅助工厂布置	63
3.4 试验、监测中心	69
3.5 施工供水	70
3.6 施工供电	73
3.7 施工供风	76
3.8 拌和系统布置	79
3.9 左岸缆机辅助吊运平台设计与施工	90
4 导流工程施工	96
4.1 工程概况	96
4.2 上下游围堰工程	98
4.3 基坑排水	101
4.4 大坝上下游充水	104
4.5 左岸导流洞下闸	104
4.6 导流洞封堵	107
4.7 导流底孔下闸与封堵	122
4.8 左岸导流洞检修与维护	131
4.9 工程蓄水	132

5	大坝左岸基础开挖与支护工程	133
5.1	工程概况	133
5.2	左岸坝肩高程 1885.00m 以上边坡开挖	138
5.3	左岸大坝基础开挖	148
5.4	左右岸基础帷幕灌浆洞和坝基排水洞施工	163
5.5	大坝边坡支护工程施工	166
5.6	坝基地质缺陷处理	176
5.7	质量控制	177
5.8	安全与文明施工管理	179
5.9	总结	181
6	大坝与垫座混凝土施工	182
6.1	概述	182
6.2	混凝土施工布置	188
6.3	混凝土配合比	194
6.4	大坝混凝土施工规划	195
6.5	大坝混凝土浇筑生产性试验	201
6.6	拱坝测量与形体控制	205
6.7	大坝混凝土浇筑工艺、方法	207
6.8	闸墩预应力锚索施工	225
6.9	大坝接缝灌浆	230
6.10	上游坝面聚脲喷涂	243
6.11	垫座混凝土施工及廊道回填	244
6.12	大坝混凝土施工缆机浇筑效率	246
6.13	大坝混凝土施工进度管理	248
6.14	大坝混凝土施工质量控制	254
6.15	大坝混凝土施工安全管理	265
6.16	经验与思考	268
7	大坝混凝土温度控制	270
7.1	大坝混凝土温度控制基本资料	270
7.2	大坝混凝土温控特点	275
7.3	大坝混凝土温度控制技术要求	276
7.4	大坝混凝土温度控制措施	281
7.5	大坝混凝土温控实施情况与效果评价	294
7.6	经验与思考	301
8	大坝基础处理工程	303
8.1	概述	303
8.2	坝基断层处理	307
8.3	左岸坝基接触、固结灌浆	309
8.4	坝基帷幕灌浆	322

8.5	坝趾及抗力体加固锚索	337
8.6	坝基排水孔施工	337
8.7	实施进度	338
9	左岸基础处理工程	340
9.1	概述	340
9.2	左岸抗力体加固工程	341
9.3	f5 断层处理	357
9.4	煌斑岩脉处理	363
9.5	水泥—化学复合灌浆	364
9.6	帷幕灌浆	369
9.7	排水孔施工	382
9.8	施工进度	383
10	水垫塘、二道坝与雾化区边坡工程	385
10.1	工程概况	385
10.2	施工布置	390
10.3	边坡开挖与支护施工	393
10.4	水垫塘混凝土施工	396
10.5	二道坝混凝土施工	398
10.6	雾化区贴坡混凝土施工	399
10.7	水垫塘检修	400
11	大坝金属结构制作与安装	402
11.1	工程概况	402
11.2	技术特性	403
11.3	钢衬制作与安装	405
11.4	导流底孔工作门与启闭机安装	409
11.5	放空底孔、泄洪深孔冲压水封弧形工作门与启闭机安装	413
11.6	进口平板闸门安装	417
11.7	施工管理	421
12	安全监测系统施工与管理	423
12.1	安全监测项目与类型	423
12.2	变形监测仪器施工	426
12.3	渗流渗压监测仪器施工	437
12.4	应力应变监测仪器施工	440
12.5	其他监测仪器施工	443
12.6	混凝土温度自动监测系统应用	445
12.7	监测仪器设备的管理及维护	447
12.8	仪器损失情况及其处理	447
12.9	施工期监测与数据分析	448
12.10	总结	456

1 我国高拱坝建设概况

拱坝是一种修筑在峡谷中，借助拱的作用将外部荷载主要传递给两岸山体的挡水建筑物。拱坝主要依靠坝体混凝土的抗压性能和两岸坝基岩体的支承作用保证坝体的稳定，相比重力坝坝体体积小，工程量小；同时，拱坝属高次超静定空间结构，超载能力强，对坝体应力变化的适应能力强，抗震性能好，是经济性和安全性都比较优越的坝型。

1.1 我国高拱坝建设概况

按照《混凝土拱坝设计规范》（DL/T 5346—2006）的规定，坝高超过 100m 的拱坝属于高拱坝。经过几十年的建设发展，我国的高拱坝数量已达 30 多座，拱坝的型式更加多样，混凝土重力拱坝已较少采用，布置于窄河谷、坝身泄洪坝后消能、形体优化、经济指标优越的双曲拱坝成为拱坝坝型的主流。

目前，我国已相继建成或正在建设的坝高超过 200m 的特高拱坝达 10 余座，如已完工的二滩拱坝（坝高 240m）、小湾拱坝（坝高 292m）、构皮滩拱坝（坝高 232.5m）、拉西瓦拱坝（坝高 250m），和正在建设中的大岗山拱坝（坝高 210m）、溪洛渡拱坝（坝高 285.5m）、锦屏一级拱坝（坝高 305m）、白鹤滩拱坝（坝高 289m）、乌东德拱坝（坝高 265m）等，尤其是锦屏一级水电站拱坝坝高达到了 305m，是目前世界上已建成的最高拱坝。以上这些高拱坝中，二滩水电站拱坝已经多年正常运行，该工程在高拱坝设计方法和准则、“大泄量、窄河谷”条件下的泄洪消能、混凝土温控防裂等诸多领域取得的创新性成果，为后续特高拱坝的建设提供了宝贵的经验，是我国特高拱坝建设史上的里程碑工程^[12]。

根据公开资料，我国已建和在建的坝高超过 100m 的混凝土拱坝情况见表 1.1-1。

表 1.1-1 我国已建和在建的坝高 100m 以上的混凝土拱坝一览表

工程名称	河流	省（自治区、直辖市）	坝型	坝高 /m	坝顶中心弧长 /m	拱冠厚度/m		厚高比	坝体积 /m³	坝基岩石	建成时间 /年
						顶部	底部				
蔺河口	岚河	陕西	碾压混凝土双曲拱坝	100.0	311.0	6.0	27.0	0.27	29.5	凝灰岩、板岩	2003
紧水滩	龙泉溪	浙江	三心圆双曲拱坝	102.0	350.6	5.0	26.0	0.26	30.0	花岗岩	1988
华光潭一级	分水江	浙江	抛物线双曲拱坝	103.85	227.9	5.8	18.88	0.168	15.03	凝灰岩	2005

续表

工程名称	河流	省（自治区、直辖市）	坝型	坝高/m	坝顶中心弧长/m	拱冠厚度/m		厚高比	坝体积/m³	坝基岩石	建成时间/年
						顶部	底部				
白莲崖	淠河	安徽	碾压混凝土双曲拱坝	104.6	422.988	8.0	29.894	0.286	64.51	花岗岩、片麻岩	2009
招徕河	招徕河	湖北	碾土混凝土双曲拱坝	105.0	198.05	6.0	18.5	0.17	22.0	白云岩	2005
天花板	牛栏江	云南	碾压混凝土双曲拱坝	107.0	159.87	6.0	24.086	0.212	28.4	白云岩	2011
石门子	塔西河	新疆	碾压混凝土双曲拱坝	109.0	176.5	5.0	30.0	0.28	21.1	砾岩、砂岩、泥岩	2001
黄花寨	格凸河	贵州	碾压混凝土双曲拱坝	110	287.625	6.0	26.5	0.24	29.0	硅质灰岩	2012
石门坎	把边江	云南	抛物线双曲拱坝	111.0	296.26	7.0	23.92	0.22	35.0	砂岩、粉质泥岩	2010
凤滩	酉水	湖南	空腹重力拱坝	112.5	488.0	6.0	11~20	0.54	117.0	砂岩、板岩	1979
锦潭	黄洞河	广东	椭圆形双曲拱坝	123.3	224.13	5.0	21.57	0.175	23.46	石英砂岩夹粉砂岩	2007
藤子沟	龙河	重庆	椭圆形双曲拱坝	124	335.44	5.0	20.01	0.17	33.0	长石石英砂岩、泥岩	2006
周公宅	大皎河	浙江	抛物线双曲拱坝	125.5	457.3	6.72	26.25	0.21	57.91	凝灰岩	2007
云龙河三级	云龙河	湖北	三心圆碾压混凝土双曲拱坝	129	143.69	5.5	18.1	0.13	18.0	灰岩	2009
沙牌	草坡河	四川	碾压混凝土双曲拱坝	132	250.25	9.0	28	0.238	39.2	花岗闪长岩	2002
大花水	清水河	贵州	碾压混凝土双曲拱坝	134.50	287.56	7.0	23~25	0.17	29.0	灰岩、砂岩等	2007
洞坪	忠建河	湖北	对数螺旋双曲拱坝	135	249.6	5.0	23.5	0.174		灰岩	2006
立洲	木里河	四川	碾压混凝土双曲拱坝	132.0	201.82	7	26.0	0.19	30.0	灰岩	2015
江口	芙蓉江	重庆	椭圆形双曲拱坝	139	368.67	6.0	22.8	0.164	66.0	灰岩、白云岩	2003
三里坪	南河	湖北	碾压混凝土双曲拱坝	133.0	284.62	5.5	22.7	0.17	39.2	灰岩	2012
白山	松花江	吉林	重力拱坝	149.5	676.5	9.0	62.8	0.42	163.0	混合岩	1987
隔河岩	清江	湖北	重力拱坝	151.0	653.5	8.0	75.5	0.50	268.0	石灰岩	1996

续表

工程名称	河流	省（自治区、直辖市）	坝型	坝高/m	坝顶中心弧长/m	拱冠厚度/m		厚高比	坝体积/m³	坝基岩石	建成时间/年
						顶部	底部				
东风	乌江	贵州	抛物线双曲拱坝	153.0	254.35	6.0	25.0	0.163	43.0	石灰岩	1993
东江	耒水	湖南	双曲拱坝	157.0	363.0	7.0	35.0	0.223	100.0	花岗岩	1987
杨房沟	雅砻江	四川	双曲拱坝	158.0							项目启动
盖下坝	长滩河	重庆	椭圆双曲拱坝	160.0	153.31	6.0	15.14	0.107	20.0	灰岩夹泥质白云岩	2013
李家峡	黄河	青海	三心圆双曲拱坝	165.0	407.2	8.0	47.0	0.285	110.0	角闪斜长岩、混合岩	1999
万家口子	格香河	云南	碾压混凝土双曲拱坝	167.5	413.16	9.0	36.0	0.215	97.0	白云岩	2014
龙羊峡	黄河	青海	重力拱坝	178.0	396.0	15.0	80.0	0.45	165.0	花岗岩、砂板岩	1989
大岗山	大渡河	四川	抛物线双曲拱坝	210.0	622.42	10.0	52.0	0.248		花岗岩	在建
构皮滩	乌江	贵州	抛物线双曲拱坝	232.5	552.55	10.25	50.28	0.216	246	灰岩	2010
二滩	雅砻江	四川	抛物线双曲拱坝	240.0	769.0	11.0	55.74	0.232	414	玄武岩、正长岩	1998
拉西瓦	黄河	青海	对数螺旋双曲拱坝	250.0	475.8	10.0	49.0	0.196	254	花岗岩	2010
溪洛渡	金沙江	四川/云南	抛物线曲拱坝	285.5	681.5	14.0	60.0	0.216	665.7	玄武岩	2014
小湾	澜沧江	云南	抛物线双曲拱坝	292.0	922.74	13.0	69.49	0.238	761	片麻岩	2010
锦屏一级	雅砻江	四川	抛物线双曲拱坝	305.0	552.23	16.0	63.0	0.207	476.5	大理岩、砂板岩	2014
白鹤滩	金沙江	四川/云南	双曲拱坝	289.0	746.92	13.0	72.00	0.242			启动
乌东德	金沙江	四川/云南	双曲拱坝	265.0	325.67	9.95	45.45	0.172	273.0	大理岩、白云岩	启动

1.2 我国高拱坝的发展趋势及特点

进入 21 世纪，随着国家“西部大开发”战略的深入实施以及电能结构调整，水电开发迎来了又一个春天，建设主战场逐渐转移至水能资源丰富的西部高山峡谷地区，这些地区人烟稀少、山高谷窄、水流落差大、土地淹没少，许多坝址都适合修建高拱坝。并且，随着国家经济发展和科学技术的进步，工程设计、施工技术的突破，体形更加优化、经济

的特高双曲拱坝越来越多，拱坝的坝高不断被刷新，开发难度大、建设周期长的一批世界的特高拱坝得到了建设。

就 21 世纪以来建设的特高拱坝分析，我国特高拱坝发展呈现出以下总的特点：①大坝高度已经突破 300m，建设地点转移至西南偏远地区；②坝高库大、总水推力巨大，坝体应力水平高；③施工强度高，建设速度快；④地形地质条件复杂，高边坡及坝基处理难度大。

1.2.1 工程建设环境复杂

随着水电开发的深入，水电开发的主战场明显地转移至西部水资源丰沛地区，特高拱坝工程所在地的地域特征非常明显。我国目前已建、在建和规划中的坝高超过 200m 的拱坝，主要分布于雅砻江、金沙江和澜沧江流域，工程所在地多为四川省、云南省的高山峡谷地区，工程区远离城镇，交通不便，经济欠发达，且多为少数民族地区，工程建设的外部环境非常复杂，客观上增大了工程建设投资和建设难度。

1.2.2 工程区地质条件复杂

高拱坝工程所在区域大都位于深山峡谷，河谷断面呈典型的 V 形或 U 形，修建高拱坝的地形条件良好，但大多河谷地形、地质条件不对称，区域地质构造发育、地质活动强烈，卸荷作用明显，许多工程还位于地震活动带，地质条件非常复杂。

高拱坝对坝基地质条件的要求非常严格，尤其拱座的抗滑稳定是保证大坝安全的关键，坝基复杂的地质条件必然大大增加了拱坝设计与施工的难度。同时，狭窄的河谷也加大了坝后消能设施布置的难度，而消能产生的两岸雾化作用也增大了下游岸坡的防护难度。

1.2.3 坝高库大、总水推力巨大、坝体应力水平高

坝高库大、总水推力大、坝体主压应力量级高是特高拱坝的基本特点。已建二滩水电站坝高 240m，库容达到了 58 亿 m^3 ，总水推力达到了 782 万 t；小湾水电站坝高 294.5m，总库容达到了 150 亿 m^3 ，设计总水推力 1660 万 t。在建的溪洛渡水电站大坝坝高 285.5m，坝顶弧长 698.7m，总库容 126.7 亿 m^3 ，设计总水推力达到了 1400 万 t；锦屏一级水电站坝高 305m，坝顶弧长 552.23m，总库容 77.6 亿 m^3 ，总水推力接近 1200 万 t；即将开工建设的白鹤滩大坝坝高 289m，坝顶弧长 746.92m，设计总库容 188 亿 m^3 ，总水推力更是达到了 1670 万 t。巨大的水推力使坝体压应力水平较高，如小湾拱坝最大压应力达到 10.4MPa，二滩水电站大坝的最大压应力达到了 8.82MPa，溪洛渡水电站大坝最大压应力达到了 8.92MPa，锦屏一级水电站大坝最大压应力也达到了 7.77MPa，均超过了国内外同类大坝的平均应力水平。

坝体高主应力给工程设计带来了坝体厚度大、混凝土强度高等问题，也就造成了坝体混凝土温度控制的难题。

1.2.4 坝身设置泄洪孔口、泄洪流量大、泄洪功率大

拱坝泄洪一般有坝身泄洪、岸边泄洪和联合泄洪 3 种形式，从近年已建和在建的坝高超过 200m 的高拱坝泄洪布置看，由于具有“高水头、大泄量、窄河谷”的特点，均采用了坝身设置泄洪孔口泄洪，泄量巨大的也采用岸边泄洪洞+坝身泄洪的组合泄洪方式。

坝高 H 大，泄洪流量 Q 大，泄洪功率 γQH 就越大，泄洪功率反映了泄洪消能的技

术难度。小湾校核下泄流量 20540m³/s，泄洪功率 46400MW；二滩校核下泄流量 23900m³/s，泄洪功率 39000MW；溪洛渡下泄流量 46800m³/s，泄洪功率 94100MW，泄洪功率指标居同类工程前列。

表 1.2 - 1 我国坝高超过 200m 的拱坝泄洪布置工程实例表

坝名	最大坝高 /m	坝身孔口最大 泄洪量 /(m³/s)	坝身泄洪方式			泄洪洞	
			型式	孔数	宽×高 /(m×m)	数量	宽×高 /(m×m)
大岗山	210.0	5462	深孔	4	6×6	—	
构皮滩	232.5	15080	表孔	6	12×13	—	
		10760	中孔	7	7×6		
二滩	240.0	9600	表孔	7	11×12	2	13×13
		6700	中孔	6	6×5		
拉西瓦	250.0	5985	表孔	3	13×9.5	—	
			中孔	2	5.5		
			底孔	1	4×6		
乌东德	265.0		表孔	5		2	
			中孔	6			
溪洛渡	285.5	2771×7	表孔	7	12.5×13.5	4	14×12
		12880	深孔	8	6×6.7		
白鹤滩	289.0		表孔	6		3	
			深孔	7			
小湾	294.5	8140	表孔	5	11×15	1	10×12
		8846	深孔	6	6×7		
锦屏一级	305.0	1276.5×4	表孔	4	11×12	1	13×10.5
		1097×5	深孔	5	5×6		

高拱坝采用表孔、深孔泄洪，水流跌落落差大，流速和能量就大，消能难度大，由此带来一系列如空化空蚀、振动、脉动、消能防冲、防蚀及掺气雾化等问题，增加了工程设计和施工难度。坝身泄洪孔道一定程度上会削弱大坝的整体性和拱梁的承载能力，使孔口周边应力复杂。随着计算机仿真技术的发展应用，高水头工作、检修闸门制造技术的提高以及消能技术和消能工的创新应用，坝身设置泄洪孔口、流道采用整体钢衬防护，已经普遍采用，其相对于岸边泄洪节省工程量，安全性也得到了二滩、小湾、构皮滩、拉西瓦等已建成水电工程的验证。

1.2.5 坝体不设纵缝、仓面大、温控要求高

随着大载荷高速缆机的使用和温控技术的发展，为保证大坝的整体性，加快施工进度并减少工程成本，国内特高双曲拱坝均取消设置纵缝，横缝间距一般在 20m 左右，最大坝底拱冠梁厚度 50~70m，正常浇筑仓面面积控制在 1000~1500m²。有的拱坝为了控制坝体应力水平和基础处理的需要，通常在坝基增加坝下游贴角，更加大了下部基础强约束