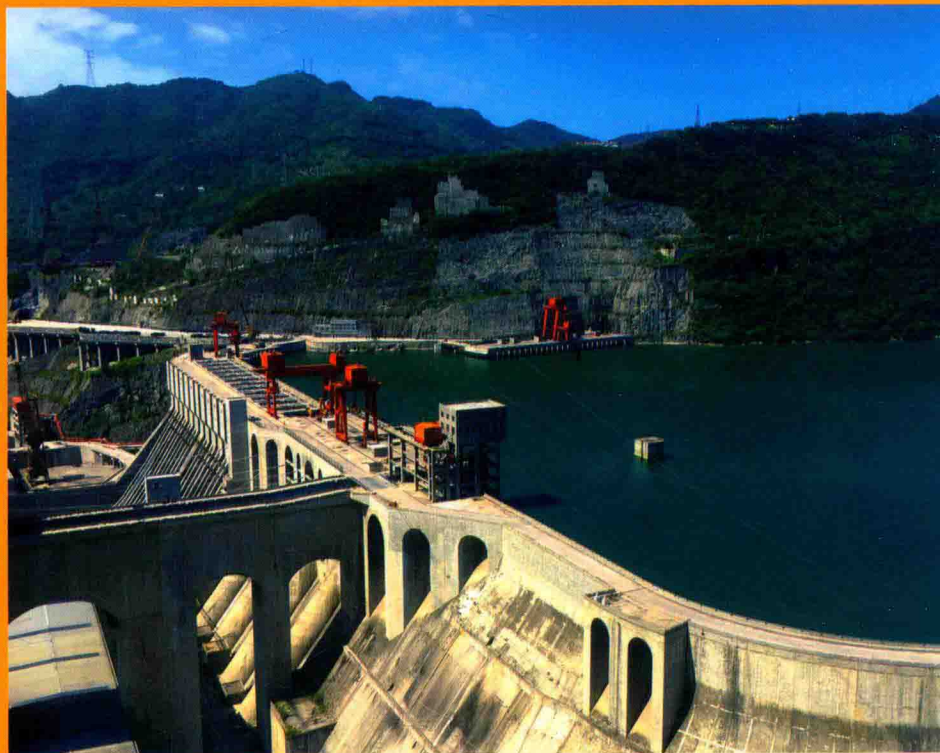


水利水电工程 抗冲耐磨材料与应用

陈 亮 汪在芹 冯 菁 等 编著



科学出版社

水利水电工程抗冲耐磨 材料与应用

陈 亮 汪在芹 冯 菁 等 编著

中国科学技术协会和中国水利学会“青年人才助力计划”资助

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

水工建筑物,尤其是泄洪与输水建筑物易遭受水流冲磨破坏,这种冲磨破坏作用会对工程安全运行造成严重威胁。本书在对水利水电工程抗冲耐磨需求分析的基础上,重点介绍应用于水工混凝土修补防护类抗冲耐磨材料的发展历程和种类;根据水利水电工程冲磨破坏特点和机理,提出水工混凝土抗冲耐磨材料的选择原则;对水利水电工程中常用的环氧树脂类、聚脲类、聚合物改性水泥基类等抗冲耐磨材料的基本原理、性能特点、代表性产品和测试、表征方法,以及各类材料的施工工艺进行介绍,最后列举抗冲耐磨材料在几个典型水利水电工程中的应用实例。

本书实用性强,可供水利水电工程建设、设计、施工,以及材料开发与应用技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程抗冲耐磨材料与应用/陈亮等编著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055506-9

I. ①水… II. ①陈… III. ①水利水电工程-抗冲击-水工材料-研究
②水利水电工程-耐磨材料-水工材料-研究 IV. ①TV4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281496 号

责任编辑:杨光华 何 念 郑佩佩/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017 年 12 月第 一 版 印张:12 3/4

2017 年 12 月第一次印刷 字数:298 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和《水利科技发展战略研究报告》中,将复杂与恶劣条件下水利工程建设关键技术研究和水工建筑物耐久性研究列为重点研究课题。党中央、国务院也对我国“十三五”期间加快水利改革发展做出了一系列决策部署,把水安全上升为国家战略,部署加快推进节水供水重大水利工程建设,决定大幅增加国家创投引导资金,促进新兴产业发展,“十三五”期间分步建设 172 项重大水利工程,为“十三五”水利改革发展指明了方向,提供了强有力的政策支持和保障。

随着我国水利水电工程建设的高速发展,高水头、大流量泄水建筑物日益增多,溢流坝、泄洪洞、泄水闸、消力池等泄水建筑物表面遭受高速水流、悬移质、推移质的冲击磨损破坏越来越普遍和严重,同时大量的通航建筑物如船闸等也因受过往船只的碰撞、摩擦而受到破坏,影响船闸混凝土的耐久性和美观。当流速较高且泥沙含量大时,水工建筑物遭受的冲刷磨损更为严重。据调查,在已建成的大中型水利水电工程中有近 70% 存在冲磨破坏现象,尤其是在黄河干流上的几个大型水电站和西南地区的水利水电工程中,水工建筑物的冲磨问题已经成为一些水电站运行中的主要病害之一,危及工程安全运行,每年需投入大量人力、财力维修。水工建筑物的冲磨问题受到了越来越多的水利水电科技工作者的重视,但多年来一直未能得到较好的解决。因此,积极开展水利工程水工建筑物抗冲耐磨研究,提高水工建筑物特别是泄水建筑物的抗冲耐磨能力并延长水利工程的安全运行寿命,已成为我国水利水电工程领域的重要课题。

长江水利委员会长江科学院在国家国际科技合作专项、水利部公益性行业专项、国家自然科学基金、中国科学技术协会和中国水利学会“青年人才助力计划”、武汉市高新技术产业科技创新团队项目、长江科学院创新团队等项目的持续资助下,通过团队合作和科技攻关,针对我国水工建筑物冲磨破坏技术难题,开发新型抗冲磨耐防护材料与配套的施工工艺,并开展了工程应用。本书是在科研项目研究成果的基础上,查阅国内外相关文献和书籍,综合归纳和总结前人的研究和应用成果,调研国内大型工程应用实例而编写。

本书是在教授级高级工程师汪在芹的指导下编写完成的,全书共分6章,第1章绪论、第2章水工抗冲耐磨原理由王媛怡编写,第3章抗冲耐磨材料由冯菁编写,第4章抗冲耐磨材料性能测试方法由肖承京编写,第5章抗冲耐磨材料施工工艺、第6章水利水电工程几个典型工程应用由陈亮编写。最后由陈亮完成全书统稿和校稿工作。

本书在分析和综述水利水电工程抗冲耐磨材料的基础上,对其进行了分类。抗冲耐磨混凝土为主要的抗冲耐磨材料,但由于其属于混凝土范畴,本书并未对其展开阐述。本书重点在于阐述水工建筑物薄层修补或后期防护用抗冲耐磨材料,这也是水工最常用的修补和防护新型材料。

本书的研究成果得到以下项目的资助,特此感谢:

- (1) 中国科学技术协会和中国水利学会“青年人才助力计划”(2015~2017年);
- (2) 国家自然科学基金面上项目“低渗性不良地质体化学灌浆浸润渗透能力动力学研究”(51378078);
- (3) 中国华能集团科技项目“高海拔地区水工建筑物过流区抗冲磨防护技术研究”(HNKJ15-H14);
- (4) 武汉市高新技术产业科技创新团队项目“水利工程病害治理及长效防护新材料与新技术研究”(2016070204020166)。

在项目研究和本书编写过程中,得到了中国水利学会、华能集团技术创新中心、中国华能集团有限公司西藏分公司等单位领导和专家的关心和帮助,在此一并致以衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请各位读者批评指正,有机会再版时一并补充更正。



2017年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 抗冲耐磨防护的重要性	2
1.2 抗冲耐磨材料的发展	8
1.2.1 初期无机护面材料阶段	8
1.2.2 中期高性能混凝土阶段	10
1.2.3 近期有机抗冲耐磨材料阶段	13
1.2.4 抗冲耐磨材料研究的发展方向	14
1.3 抗冲耐磨材料的分类	16
1.3.1 无机抗冲耐磨材料	17
1.3.2 有机抗冲耐磨材料	18
第 2 章 水工抗冲耐磨原理	23
2.1 水工建筑物	24
2.1.1 水工建筑物的分类	24
2.1.2 水工建筑物的特点	25
2.2 水工建筑物冲磨破坏原理	27
2.2.1 冲磨破坏的部位及形态特征	27
2.2.2 冲磨介质的分类	27
2.2.3 材料磨损公式	28
2.2.4 悬移质冲磨破坏机理及影响因素	30
2.2.5 推移质冲磨破坏机理及影响因素	32
2.3 抗冲耐磨材料的设计	36
2.3.1 抗冲耐磨材料的选择原则	36
2.3.2 抗冲耐磨材料的基本性能	36

第3章 抗冲耐磨材料	39
3.1 环氧树脂抗冲耐磨材料	40
3.1.1 基本原理	40
3.1.2 环氧基液	56
3.1.3 环氧胶泥	57
3.1.4 环氧砂浆	58
3.1.5 环氧混凝土	63
3.1.6 环氧树脂改性技术	65
3.2 聚合物改性水泥基抗冲耐磨材料	70
3.2.1 基本原理	71
3.2.2 丙乳砂浆	73
3.2.3 改性丙乳砂浆	76
3.2.4 聚乙烯-乙酸乙烯共聚乳液砂浆	76
3.2.5 聚合物乳液混凝土	77
3.3 聚脲抗冲耐磨材料	77
3.3.1 基本原理	78
3.3.2 双组分喷涂聚脲	90
3.3.3 双组分聚天冬氨酸酯聚脲	92
3.3.4 单组分聚脲	94
3.3.5 配套界面剂	96
3.4 其他抗冲耐磨材料	97
第4章 抗冲耐磨材料性能测试方法	99
4.1 抗冲耐磨性能测试	100
4.1.1 方法概述及适用范围	100
4.1.2 水下钢球法	100
4.1.3 圆环法	103
4.1.4 水砂磨损机试验法	106
4.1.5 高速水砂法冲磨试验	109
4.1.6 风砂枪法	109
4.1.7 其他冲磨试验方法	113
4.1.8 漆膜抗冲耐磨性能测试	116
4.2 抗空蚀性能测试	119
4.2.1 试验设备	119
4.2.2 试验方法及步骤	120
4.2.3 试验结果计算	120

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 抗冲耐磨防护的重要性	2
1.2 抗冲耐磨材料的发展	8
1.2.1 初期无机护面材料阶段	8
1.2.2 中期高性能混凝土阶段	10
1.2.3 近期有机抗冲耐磨材料阶段	13
1.2.4 抗冲耐磨材料研究的发展方向	14
1.3 抗冲耐磨材料的分类	16
1.3.1 无机抗冲耐磨材料	17
1.3.2 有机抗冲耐磨材料	18
第 2 章 水工抗冲耐磨原理	23
2.1 水工建筑物	24
2.1.1 水工建筑物的分类	24
2.1.2 水工建筑物的特点	25
2.2 水工建筑物冲磨破坏原理	27
2.2.1 冲磨破坏的部位及形态特征	27
2.2.2 冲磨介质的分类	27
2.2.3 材料磨损公式	28
2.2.4 悬移质冲磨破坏机理及影响因素	30
2.2.5 推移质冲磨破坏机理及影响因素	32
2.3 抗冲耐磨材料的设计	36
2.3.1 抗冲耐磨材料的选择原则	36
2.3.2 抗冲耐磨材料的基本性能	36

6.1.3	施工工艺	148
6.1.4	实施效果	151
6.2	乌江沙沱水电站工程应用	153
6.2.1	工程概况	153
6.2.2	材料选择	154
6.2.3	施工工艺	155
6.2.4	实施效果	160
6.3	乌江构皮滩水电站工程应用	164
6.3.1	工程概况	164
6.3.2	材料选择	164
6.3.3	施工工艺	166
6.3.4	实施效果	173
6.4	清江隔河岩水利枢纽工程应用	175
6.4.1	工程概况	175
6.4.2	材料选择	176
6.4.3	施工工艺	179
6.4.4	实施效果	184
参考文献		186

第 1 章

绪 论

水是人类经济活动和生活不可或缺的自然资源,水利事业是国民经济发展的重要基础设施,不仅直接关系到防洪安全、供水安全、粮食安全,而且关系到经济安全、生态安全、国家安全。近年来,我国经济发展前景和市场空间广阔,全社会对水利高度关注,一大批国家重点水利工程,尤其是近年来实施的 172 项重大水利工程,正在规划和兴建中。这些水利工程在水力发电、农业灌溉、防洪度汛及推进国民经济建设等方面有着重要的现实意义,工程的安全运行同时影响着整个工程效益的充分发挥和人民的生命财产安全。

我国水利水电工程多位于西部河流落差较大的地区,由于这些地区水流湍急,水中夹杂大量泥、沙、石等悬移质、推移质,会对水工泄水建筑物、输水隧洞、输水渠道等建筑物及河道等造成严重的冲刷和磨蚀破坏,严重影响着工程的安全运行。调查研究发现,全世界 70% 以上的大中型水利水电工程存在冲磨破坏现象,每年汛期后均需对水损建筑物进行维修,耗费了大量人力物力财力。由于水工建筑物冲磨破坏问题涉及自然因素、设计、材料、施工等诸多方面,到目前为止这一问题尚未完全攻克,因此开发水利水电工程抗冲耐磨材料并开展应用研究,对于提高水工建筑物的安全服役寿命具有重要意义。

1.1 抗冲耐磨防护的重要性

携带大量悬移质和推移质泥沙的高速水流对水工建筑物混凝土的冲刷磨损是水工泄水建筑物常见的病害之一,这种病害主要发生在大坝的溢洪道、通航建筑物的闸室底板、输水廊道及大坝底部的排沙孔等部位,修复十分困难。因此,对水利水电工程而言,过水建筑物混凝土的冲刷磨损是不可忽视的重要问题,已引起相关工程技术人员的高度重视。

通常,我们将含悬移质泥沙水流对混凝土的冲磨破坏称为悬移质破坏,它主要是由紊流猝发导致的涡旋造成的,破坏形式多表现为磨损、切削;含推移质泥沙水流对混凝土的冲磨破坏称为推移质破坏,大粒径的推移质泥沙顺水流在混凝土表面滑动、滚动、跳跃,对混凝土既有摩擦、切削破坏,又有冲击、撞击破坏,冲磨破坏作用最为严重。因此,推移质泥沙常常比悬移质泥沙更具危害性。而且在含推移质泥沙水流中,不可能只含有大粒径的推移质泥沙,往往还含有大量的悬移质泥沙,含推移质泥沙水流对混凝土的冲磨破坏往往是悬移质泥沙与推移质泥沙共同作用的结果。当混凝土局部遭受冲磨破坏后,混凝土表面平整度下降,进而诱导高速水流产生空蚀,使得混凝土在“冲击-撞击-空蚀”的连续作用下加速破坏。

我国西南地区一些河流的上中游多为深山峡谷,山高坡陡,水流湍急,由岸坡崩坍而形成的大量泥沙顺流而下,建在这些河道上的水工建筑物常常遭到含沙水流的冲磨破坏。水工建筑物的过流面部位,如溢流坝、溢洪道、泄洪隧洞、泄水闸闸室底板、护坦、消力墩、排沙底孔的底板及边墙等,当受到高速挟沙水流或挟带推移质水流的冲击并经历一定运行时间后,往往会出现不同程度的磨蚀和冲砸破坏或气蚀破坏,导致表面混凝土大面积剥蚀,甚至造成钢筋出露和破坏。过流面混凝土的破坏不仅会影响建筑物自身的安全运行,而且还会对其毗邻建筑物的安全造成威胁,进而对工程的整体寿命产生极大的影响。

由于受到高速水流的冲刷,部分水利工程泄水建筑物冲刷面混凝土建成后不久就磨损严重,必须重新投入大量人力物力进行维修,有的工程曾采用多种材料和技术进行数次修补维护,但抗冲耐磨效果仍不理想。对水工建筑物破坏情况的调查结果表明,在已建的大中型水利水电工程中,有近 70% 存在冲磨、空蚀破坏,这些问题的存在严重影响了建筑物的安全运行及效益的发挥。下面列举几个国内外典型水利枢纽的冲刷磨损情况及部分应对措施(祖福兴,2010;杨春光,2006;黄国兴和陈改新等,1998;韩素芳,1996)。

刘家峡水电站拦河大坝为混凝土重力坝,最大坝高 147 m。泄水道的功能主要是泄洪、排沙、灌溉和放空水库。设计水位时总泄量 $1488 \text{ m}^3/\text{s}$,检修门槽处最大平均流速 25.3 m/s ,工作门后最大平均流速 31.0 m/s ,属高速水流建筑物。泄水道 1969 年投入运行。1998 年电厂结合第二次大坝安全定期检查,对泄水道磨蚀情况进行全面检测,特别是对常年处于水下的检修门槽及其上游部位进行水下电视和潜水检查,结果发现泄水道 2 号孔进水口磨蚀破坏严重。底板部位原涂抹的 10 mm 厚的环氧树脂砂浆(简称环氧砂浆)早已磨蚀完了;检修

门槽部位钢衬磨蚀深度普遍达 9.3 mm,工作门槽部位普遍达 11.6 mm,并形成星罗棋布的大小孔洞,深达 50~70 mm,在钢衬下互相贯通,脱空面积达 70%以上;底板钢衬与上游混凝土接触处,磨蚀成一道锯齿形沟槽,宽约 70 mm,深达 120 mm,定型工字钢外露;钢衬上游混凝土磨蚀深度达 30~40 mm,粗骨料裸露呈悬浮状。左侧中墩混凝土距底板以上 1.5 m 范围内磨蚀严重,钢筋外露,最深达 110 mm,1.5 m 以上磨蚀深度逐渐减小,5.0 m 以上混凝土表面呈麻面状,顶部混凝土完好。右侧墙破坏情况与左中墩基本相同。在工作门槽处,除底板钢衬磨蚀外,工作门槽的滚轮主轨也遭受严重磨蚀。主轨踏面上,自底板至孔顶磨蚀成坑槽状,长度为 20~60 mm 不等,宽度为 3~12 mm,间距为 20~70 mm,中下部密,上部稀;圆弧护角处呈指印状的坑槽(顺水流方向)紧密相连,严重处已蚀穿钢板,露出了混凝土;左侧主轨及护角的磨蚀比右侧严重,左圆弧护角在距底板 3~6 m 范围被冲走。

刘家峡水电站拦河大坝右岸永久泄洪洞,由原施工导流隧洞改建而成。平面布置为一直线,泄洪水头约 120 m,最大流速 40~45 m/s。该泄洪洞从施工导流,到永久泄洪洞斜井段开挖完毕,再到过水斜井反弧段用 30 cm 厚的 300 号混凝土(旧标号,约等于 C28 强度混凝土)衬砌后正式运行,曾先后发生三次严重破坏。关于第三次正式运行所产生的严重破坏,现场会比较一致的意见为:主要是混凝土表面不平整(底板上有凸体、错台和钢筋头等)引起的气蚀破坏连锁反应,造成了大面积的气蚀破坏。之后用环氧砂浆及 300 号混凝土进行了修补,并注重了表面的平整度,但效果并不理想。

黄河三门峡水利枢纽工程于 1960 年基本建成,并开始蓄水。三门峡大坝泄水排沙钢管和底孔的水头为 20~35 m,最大流速约为 17 m/s,年平均含沙量约为 40 kg/m³,日平均最大含沙量约 640 kg/m³,泄流期间基本处于满流状态,由于高含沙水流使泄洪建筑物严重损坏,底孔整个周界面上均有磨损现象,底板、侧墙的 R200 混凝土表面磨损较严重,顶板较轻。2 号底孔累计运行 18 842 h 后,先后对底孔的单层孔和双层孔进行了全面检查,发现工作门后形成四处大面积冲蚀坑,一般坑深 20 cm,底部钢筋已被磨扁或磨细,侧墙 3 m 以下混凝土表面磨损严重,80~120 mm 特大骨料裸露。单层孔和双层孔进口斜门槽正向不锈钢导轨在高程 282.5~288.0 m 的迎水面有不连续的沟槽或缺口(斜门槽为矩形断面,宽 120 cm、深 55 cm),严重部位导轨磨损呈锯齿状,有的部位导轨及基座方钢几乎磨平;单层孔和双层孔进口斜门槽水封座板在高程 281.0~290.0 m 处破坏呈锯齿状和蜂窝状,在门槽边缘 10 cm 范围内及侧面角钢大部分磨穿,混凝土被淘深 2~8 cm;单层孔和双层孔进口门槽底坎被淘成锅底状,底孔中心部位混凝土淘深 8~15 cm,大部分钢板被磨损破坏;单层孔和双层孔底孔进口喇叭口顶板(椭圆曲线)有一定的破坏,高程 291.0 m 以下的钢板护面已被磨穿,但混凝土基本完好;单层孔工作门槽在高程 282.0~284.0 m 范围内的导轨严重损坏,有大如手指顺水流向的槽坑和缺口;双层孔工作门槽在高程 282.0~288.0 m 底孔段范围内的导轨均有破坏,在高程 287.0~288.0 m 范围内最为严重,导轨的一半已被剥蚀,在高程 300.0~306.0 m 深孔段门槽内导轨有沟槽状破坏,在高程 300.0~302.0 m 范围内较严重,导轨呈锯齿状,在串水门井段(高程 288.0~300.0 m)的混凝土及不

锈钢导轨未发现损坏;底孔底板严重磨损,破坏面积占 4/5,粗骨料全部外露,平均磨深 14 cm,并有多处冲坑,最大冲坑面积约 $5.6\text{ m} \times 2.3\text{ m}$,深 0.2 m,钢筋外露 20 余根,有的钢筋磨掉 1/3 左右;底孔边墙在高程 284.0 m 以下有较严重磨损,混凝土粗骨料外露,最大磨损深度约 7 cm,高程 284.0 m 以上磨损较轻,底孔顶板无明显磨损痕迹。

三门峡大坝底孔的 300 号抗磨混凝土或水泥砂浆抹平层,经过三个汛期运行后,检查发现底板两侧墙的下部磨蚀严重,气蚀坑直径 6~12 cm,深 2~6 cm。闸门槽轨道面上的不锈钢也有直径为 0.5~2.0 cm 的鱼鳞坑。先后分别铺砌了环氧砂浆、辉绿岩铸石板、水泥石英砂浆及钢板等几种材料,效果均较好。其中 3 号底孔的比较试验结果如下:①辉绿岩铸石板。辉绿岩铸石板经过精细施工,如能保证完好的黏接,其抗磨性能超过钢材,是最耐磨损的一种材料。由于环氧砂浆的施工质量难以保证,故铸石作为耐磨损材料,其成败的关键是黏接材料。②环氧砂浆。环氧砂浆是由环氧树脂和胺类固化剂等材料与石英砂拌和而成,具有很高的强度。在其面上没有发现剥离裂缝或磨蚀的坑洞,表面磨损约 1 mm,抗磨性能较好。③水泥石英砂浆。水泥石英砂浆用 500 号普通硅酸盐水泥(P.O 425)拌制,水灰比为 1:2.85,灰砂比为 1:1.37。表面磨损虽较严重,出口段较检修闸门后尤甚,磨损约 5 mm,但没有发现剥离和大的坑洞。由于灰砂比大,水泥用量多,又未掺外加剂,多余水分会在砂浆中形成许多孔洞,约占砂浆总体积的 60%,加之其布置在底孔的出口段,水流条件差,从而加速了磨损。④钢材。三门峡的实践表明,钢材的抗磨性能低于铸石、环氧砂浆和抗冲耐磨混凝土。例如,5~8 号钢管的 30 号钢板镶护层和水轮机组过水部件表面的铬五铜钢抗磨层,经过一个汛期的洪水冲刷,就受到严重的冲蚀破坏。

葛洲坝水利枢纽二江泄水闸位于长江干流上的葛洲坝水利枢纽,年平均输沙量达 $5125 \times 10^8\text{ t}$,悬移质约占 98%,推移质实测最大粒径达 350 mm。二江泄水闸是该坝最主要的泄水排沙建筑物,设计最大流速 17~22 m/s,1981~1994 年,实际最大泄量 $65\,600\text{ m}^3/\text{s}$,受弯道河势影响,磨蚀破坏呈左轻右重态势,且闸室比护坦严重,右侧 24~27 号孔底板中部曾磨蚀成宽达 6~8 m、深 10 cm 的沟槽,弧门底坎 12 mm 厚钢板局部磨穿,闸室侧墙 3 m 以下大骨料出露,闸室以下 40~50 m 范围护坦最大磨蚀深度 5~6 cm,中、小骨料外露。该坝经过 14 次检修,基本掌握了泥沙的磨蚀规律。

龚嘴大坝位于西南山区大渡河上的龚嘴大坝,近年来坝前泥沙进一步粗化,2001 年与 1994 年相比,最大粒径由 1107 mm 增至 1117 mm,汛期洪水还夹带大量鹅卵石过坝。1989 年整治后的消力塘,2002 年检查时发现,周边骨料普遍外露,局部钢筋脱落、混凝土淘空,底部被鹅卵石覆盖。6 号、10 号、15 号三个冲沙底孔自 1971 年以来,分别运行 11 156 h、12 411 h 和 15 571 h(流速 21~27 m/s)。检修门后的破坏部位已分别修复了 6 次、5 次和 10 次,都未遏制住磨蚀破坏的趋势。2002 年检查时发现:进水口底部混凝土大面积缺损,局部钢筋悬空于表面;侧墙钢板水封滑道上的沟槽磨蚀深度达 10~20 mm;工作门后面边墙 6 m 以下的混凝土骨料和大量钢筋外露,平均冲坑深度达 20 cm。

南娅河石棉二级水电站是大渡河支流南娅河上的引水式径流发电站。五十年一遇设

计洪水为 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ ，目测个别过闸推移质大颗粒粒径 $1.0\sim 1.5\text{ m}$ ，于 1965 年建成发电。当年汛后（实测洪峰流量分别为 $280\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $380\text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流速约 12 m/s ），首部枢纽的冲沙闸底板和护坦的 150 号混凝土被冲成深槽，最深处为 70 cm ，埋设的小于 28 mm 钢筋全部磨断，护坦后的钢筋石笼海漫大部冲坏冲走，危及闸身的安全，曾进行多次修复。

美国大古里水电站的溢洪道鼻坎，1943 年 3 月潜水检查，发现一个很大的破坏区，深度为 $0.3\sim 1\text{ m}$ ，采用沉箱法经 8 年修复。该坝的中层泄水孔（水头 $60\sim 75\text{ m}$ ），由于底板以 $1:20.8$ 的斜率突然扩散，引起气蚀，以致出口侧墙的钢筋露出，修建 $127\text{ mm}\times 152\text{ mm}$ 的通气槽后，运行了 $12\,000\text{ h}$ 未再发生破坏。

美国的万希普、纳瓦约等大坝，在泄洪洞出口处平板闸门下游（水头 $42\sim 96\text{ m}$ ），气蚀引起了闸门下游混凝土不同程度的破坏。曾用环氧材料修补，仍几乎全部被破坏，而且新的破坏范围更大。之后用不锈钢板衬砌 15 m ，效果较好。

美国德沃夏克坝的溢洪道在运行 16 个月后，由于受到池内聚集在水底的卵碎石、钢筋和其他杂物冲磨，消力池遭受到严重的破坏，以致出现了深达 3 m 的冲蚀，大约 1500 m^3 的混凝土和基岩被冲蚀。曾用钢纤维和聚合物浸渍混凝土修补，初步效果良好。

美国利贝坝的泄水底孔及边墙，曾用钢纤维混凝土修补，初步效果良好。

巴基斯坦的塔贝拉坝，1976 年 4 月受到第二次破坏的消力池，用钢纤维混凝土修复，在 3 m 厚 6000 m^2 的消力池底板上浇筑 50 cm 厚的钢纤维混凝土。

印度巴克拉溢流坝在施工期间过水，混凝土护坦损坏较严重，磨损 $15\sim 23\text{ cm}$ ，最大冲坑深度为 1.06 m 。后采用水下高强混凝土修补，经过一年汛期运行后，检查表明修补冲坑的混凝土部分表面稍有磨损，其余大部分完好。

调查的其他水工建筑物冲磨、空蚀破坏情况见表 1.1。

表 1.1 我国部分水工建筑物冲磨、空蚀破坏情况表

工程名称	坝高 /m	多年平均含沙量 /(kg/m^3)	主要冲磨、空蚀破坏情况	现状
柘溪水电站	104.0	0.22	溢流坝门槽后，鼻坎消力墩受空蚀破坏	修补无效，做改形试验有改善
凤滩水电站	112.5	0.36	溢流坝面有一冲坑，底孔鼻坎左侧有一空蚀坑	已用环氧砂浆修补，未坏
陆浑水水库	55.0	3.62	输水洞门槽后空蚀，底部冲痕露出钢筋	用喷浆和高标号混凝土修补，同时限制水位运行
盐锅峡水电站	57.2	3.38	消力池冲刷，空蚀破坏； 电厂尾水池冲刷严重，水下情况不清	水上已维修 未处理
丹江口枢纽	97.0	4.85	溢流面临时台阶型断面，空蚀破坏	现已改形处理
新安江水电站	105.0	0.41	电厂尾墩冲刷露石较严重	未处理
富春江水电站	47.7	0.22	闸下鼻坎有空蚀，电厂尾墩冲刷露石 (不严重)	未处理

续表

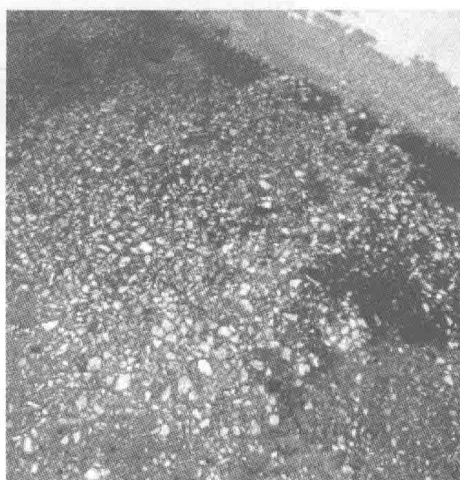
工程名称	坝高 /m	多年平均含沙量 /(kg/m ³)	主要冲磨、空蚀破坏情况	现状
安砂水电站	92.0	0.21	挑流鼻坎露石(不严重)	未处理
陈村水电站	76.3	0.14	挑流鼻坎露石	未处理
合面狮水电站	54.5	0.46	溢流面局部冲蚀	环氧修补,大部分冲落
新丰江水电站	105.0	—	溢流面真空作业混凝土完好,普通混凝土个别地方露石	未处理
佛子岭水电站	74.4	0.53	电厂尾墩有冲刷现象	未处理
梅山水库	84.2	0.13	溢洪道混凝土有剥落现象,部位在伸缩缝处	未处理
响洪甸水库	87.5	—	泄水隧洞有空蚀	门槽经改形及铸钢板衬砌,较成功,其他部位仍有小空蚀
黄龙滩水电站	107.0	0.22	挑流鼻坎局部断裂,8号坝段鼻坎局部空蚀,并有露筋	未处理
古田一级水电站	71.0	—	溢流面反弧段露石,并有数处冲坑	未处理
古田三级水电站	43.0	—	溢流面反弧段露石	未处理
青铜峡水电站	—	—	泄洪闸门槽下游空蚀; 机组尾水管出口有冲刷,钢筋外露	已修复
陆水水电站	—	0.14	泄洪道消力池趾墩后空蚀,护坦被推移质磨损	趾墩外形改建,消力池护坦用预缩砂浆修补,现完好
碧口水电站	—	349.00	泄洪道空蚀破坏; 排沙孔工作门下游空蚀; 导流洞导流期推移质磨损严重	用环氧砂浆及高强砂浆修补,现运行基本正常
都江堰水利工程	728.0	—	外江闸室下游护坦推移质磨损; 飞沙堰推移质磨损	每年检修
映秀湾水电站	21.0	—	泄洪闸推移质及漂木撞击磨损严重	每年检修,用硅粉钢纤维混凝土修补后效果较好
渔子溪水电站	—	—	拦河闸推移质磨损	每年检修
葛洲坝水电站	47.0	12.00	排沙底孔进水口检修门槽底坎冲磨破坏严重	每年检修
向家坝水电站	384.0	1.72	孔流道空蚀、磨损、刮痕; 消力池冲磨破坏,粗骨料外露	已处理,每年检修
溪洛渡水电站	285.5	1.72	消力池冲磨破坏,骨料微外露	已处理
构皮滩水电站	225.0	—	水垫塘底板冲磨破坏; 边墙推移质磨损	已修复
沙沱水电站	101.0	—	消力池池板大范围冲坑,钢筋外露; 底板、边墙表层混凝土磨蚀,钢筋外露; 溢流面裂缝,止水系统破坏	已修复
隔河岩水电站	151.00	0.74	消力池底板较大冲坑,粗骨料、钢筋外露	已处理
西藏自治区某水电站	116.0	0.53(推算)	大坝溢流坝段混凝土部分裂缝和剥落	已修复,运行3年无破损

通过上述案例可见,为保障工程的安全运行,大部分水利工程的受冲刷部位混凝土在运行一定年限后往往需要定期修补。长期不修补所造成的损失会难以估量。

随着西部大开发和西电东送发展战略的实施,我国水电工程向西部转移,水利资源的特殊性导致水流含沙量增加、水头增高、流速增大,使得含沙水流对水工建筑物的冲刷磨损破坏也越来越突出,泄水消能建筑物表面抗高速水流冲磨破坏的问题越来越受到人们的重视。例如,在溪洛渡水电站导流洞、乌江构皮滩水电站水垫塘、乌江沙沱水电站消力池、向家坝水电站消力池中均存在较为严重的冲磨破坏问题,如图 1.1 所示。随着高坝建设的迅速发展,水工泄水消能建筑物的防冲问题越来越突出,建筑物的设计难度越来越大。目前,我国众多水利工程的泄洪消能功率已经达到世界前列,从高坝泄洪消能防冲设计角度讲,已经达到国际先进水平。但是,泄洪消能建筑结构材料的气蚀、冲蚀磨损问题却远远没有得到较好的解决。



(a) 金沙江溪洛渡水电站导流洞



(b) 乌江构皮滩水电站水垫塘



(c) 乌江沙沱水电站消力池



(d) 金沙江向家坝水电站消力池

图 1.1 部分水工建筑物冲磨破坏情况

除此之外,西部地区有更严苛的环境,对抗冲耐磨材料有更高的要求和挑战。例如,西藏地区水利工程由于处在寒冷、大温差、冻融循环频繁的环境中,以及河道水流含沙量高,外界环境因素与水流冲磨破坏联合作用,建筑物破坏更加严重,如松多电站溢流槽侧墙冻融与冲磨相互作用,混凝土剥落严重,见图 1.2。查龙水电站的泄槽底板表面混凝土几乎全部出现剥蚀现象。



图 1.2 松多电站进水口前池溢流槽冲磨及冻融破坏

综上所述,解决水工建筑物过流面高速含沙水流冲磨和气蚀破坏的问题,除了水工设计方面的技术研究以外,采用性能优异的抗冲耐磨材料及修补防护材料至关重要。

1.2 抗冲耐磨材料的发展

水工混凝土建筑物中,对冲磨破坏的修复是建筑物加固工程中涉及面最广、修复频率最高的一项。我国进行抗冲耐磨材料的研究是从 20 世纪 60 年代开始的,主要是通过提高抗压强度来提高混凝土的抗冲耐磨性能,同时注意加强对过流面混凝土的防护和修补。多年来,通过对磨损破坏修复经验的不断总结,修复技术及新型抗冲耐磨材料的研究得到了很大发展。对于有冲刷磨损的水利水电工程,抗冲耐磨材料的发展可大致归纳为铸石板镶面材料、钢铁类金属材料、高强混凝土及砂浆类材料、聚合物类材料等,这些材料的使用效果与水流、泥沙特征及冲磨破坏严重程度等多种因素有关。现根据各类材料的发展历程,分别简要介绍几种主要材料的抗冲耐磨性能。

1.2.1 初期无机护面材料阶段

出于经济角度的考量和受到早年技术水平的制约,铸石板镶面材料和金属材料曾作为重要的水利水电工程抗冲耐磨材料使用。