

DUONISHA HELIU SHUILUNJI MOSHI YU
FANGHU JISHU ANLI FENXI

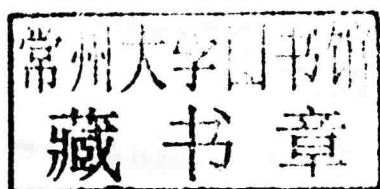
多泥沙河流水轮机磨蚀与 防护技术案例分析

武现治 李 莉 李贵勋 李 莉 著



多泥沙河流水轮机磨蚀与 防护技术案例分析

武现治 李 莉 李贵勋 李 莉 著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以案例分析的形式,重点介绍了多泥沙河流、季节性融雪地区水电站水轮机的磨蚀成因,磨蚀对水轮机运行的影响,抗磨蚀防护技术的施工工艺等内容;讲述了磨损指数与泥沙含量、水流流速、沙粒粒径级配的关系;介绍了抗磨蚀技术的历史和国内外现状;结合实际案例介绍了环氧金刚砂抗磨蚀技术、改性聚氨酯抗磨蚀技术、金属热喷涂抗磨蚀技术、耐磨焊条技术等。

本书可作为水电站、泵站、大型水库、长距离输水管道等运行管理人员的工作参考书,也可供水电机组维修人员、管道腐蚀与防护研究工作者及大专院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

多泥沙河流水轮机磨蚀与防护技术案例分析/武现治等著. —郑州:黄河水利出版社,2016.7

ISBN 978-7-5509-1514-5

I. ①多… II. ①武… III. ①多沙河流-水轮机-防腐-案例 IV. ①TK73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187301 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:郑州红火蓝焰印刷有限公司

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:6.75

字数:170 千字

印数:1—1 000

版次:2016 年 7 月第 1 版

印次:2016 年 7 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前 言

我国河流的特点之一是含沙量较大,年平均输沙量 1 000 万 t 以上的河流有 115 条,直接入海泥沙总量达 19.4 亿 t。黄河是我国泥沙含量最高的河流,年输沙量 16 亿 t,平均含沙量 37.5 kg/m^3 ,均居各河流之首。新疆地区河流多以融雪季节性河流为主,径流比较稳定,但过分集中在夏季,河流中含有大量的石块、枝条、泥沙等杂物,新疆河流水源的补给主要来源于山地降水和三大山脉的积雪、冰川融水。多泥沙河流上的水电站,都存在或面临水轮机磨蚀问题。

水轮机磨蚀破坏的主要危害表现在检修周期缩短,检修工作量增加,机组运行效率降低,检修成本高,生产不安全。以黄河三门峡水电站为例,水轮机运行 15 000 h 必须扩修,其中 4#机运行 2 年过流部件严重损坏,效率下降 8.7%,而一般水电站大修期在 5 年左右。多泥沙河流泥沙含量高,使这些河流上的水电站深受泥沙的危害,特别是水轮机泥沙磨蚀严重地威胁着机组的安全。根据各水电站水轮机的泥沙磨蚀状况分析比较,可以概括出多泥沙河流上水电站的水轮机泥沙磨蚀规律和特点。

对多泥沙河流上水电站的水轮机磨蚀与防护情况进行了深入的调查研究,通过大量的现场珍贵资料,阐述了若干典型水电站水轮机磨蚀与防护的案例,总结了水轮机抗磨蚀技术的历史、国内外现状,分析和探讨了水轮机磨蚀的基本规律,对我国多泥沙河流水轮机磨蚀防护 50 多年的各种方法、成功的经验和失败的教训进行了详尽的分析,筛选出适合不同类型水电站、不同类型机组的磨蚀防护方法与工艺。

对黄河泥沙的磨蚀特性进行了较为全面的理论分析,探讨了黄河泥沙含量、水流流速、沙粒粒径级配三大要素与材料磨蚀之间的关系,为水电站的水沙优化调度提供了理论依据。

本书所总结的水轮机磨蚀防护的有效方法与工艺(环氧金刚砂砂浆、改性聚氨酯、抗磨不锈钢堆焊等),已经在黄河流域、新疆地区的水电站广泛应用,取得了显著的效果。

本书由黄河水利委员会黄河水利科学研究院武现治、李莉(水保所)、李贵勋、李莉(工力所)撰写。其中,武现治撰写第1章1.2节,第2章2.1节、2.2节和第3章3.3节、3.4节;李莉(水保所)撰写第1章1.1节、1.3节和第4章;李贵勋撰写第1章1.4节、1.6节和第2章2.3节、2.4节;李莉(工力所)撰写第1章1.5节和第3章3.1节、3.2节。全书由武现治负责统稿。参加本书课题研究的主要有武现治、郭维克、李莉(水保所)、李贵勋、王玮屏、张彬、张艳蓉、李莉(工力所)、王兰霞、和瑞勇、宋万增、张雷、杨树红和刘义军等研究人员,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请专家、读者批评指正。

作 者

2016年4月

目 录

前 言

第 1 章 黄河流域水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(1)
1.1 黄河流域水轮机磨蚀概述	(1)
1.2 三门峡水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(29)
1.3 盐锅峡水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(67)
1.4 青铜峡水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(94)
1.5 刘家峡水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(114)
1.6 龙口水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(144)
第 2 章 新疆地区水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(154)
2.1 新疆地区水轮机磨蚀概述	(154)
2.2 红山嘴水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(160)
2.3 奎屯水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(167)
2.4 乌鲁瓦提水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析	(171)

第3章 抗磨蚀技术成果及精品推介	(178)
3.1 水轮机磨蚀机制、影响因素综述	(178)
3.2 黄河水利科学研究院水轮机磨蚀研究历史回顾	(186)
3.3 技术成果适用范围	(188)
3.4 抗磨蚀技术成果精品展示	(193)
第4章 结论与建议	(201)
4.1 主要结论	(201)
4.2 对今后工作的建议	(205)
参考文献	(210)

第 1 章 黄河流域水电站水轮机磨蚀与防护技术案例分析

1.1 黄河流域水轮机磨蚀概述

1.1.1 黄河泥沙及其物质组成

黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东九省(区),在山东省垦利县注入渤海,全长 5 464 km。

黄河流域位于北纬 $32^{\circ} \sim 42^{\circ}$,东经 $96^{\circ} \sim 119^{\circ}$,西起巴颜喀拉山,东临渤海,北起阴山,南至秦岭,总面积 79.49 万 km^2 (包括黄河内流区 4.23 万 km^2)。从河道长度和流域面积看,黄河为我国的第二大河。

根据主要自然地理条件,将整个黄河流域分为青海高原区、宁夏灌区、阿(拉善)鄂(尔多斯)沙漠草原区、黄土高原区、汾(河)渭(河)地堑谷地区、崤熊(耳)太(行)山区、下游冲积平原区、鲁中地垒山岳区等区域。黄河泥沙主要来自中上游黄土高原,龙羊峡以上的青藏高原植被较好,河流含沙量较小,青海省的唐乃亥水文站年平均含沙量仅 0.55 kg/m^3 ,平均年输沙量仅 0.11 亿 t。黄河在贵德以下进入黄土高原,泥沙逐步增加,其间有大夏河、洮河及湟水等汇入,到兰州站平均年输沙量达 1.13 亿 t。兰州以下,有祖厉河汇入,泥沙进一步增加。尤其是黄河穿越晋陕峡谷,流经黄土沟壑地区,植被差、汛期暴雨集中,水土流失严重,大量的泥沙在

汛期注入黄河,是黄河泥沙的主要来源。河口镇至龙门,有皇甫川、窟野河、三川河、无定河等多泥沙支流汇入,使龙门的平均年输沙量剧增至 10.6 亿 t。龙门至三门峡区间,又有泾河、渭河、北洛河、汾河汇入,年输沙量进一步增加,三门峡的年输沙量达到 16 亿 t。

黄河产水产沙和河床淤积的总形势是内蒙古头道拐以上的上游区水多沙少,但青铜峡至头道拐河段河床仍有相当的淤积;头道拐至潼关的中游区沙多水少,潼关以下的中下游区来水含沙量较小,河床淤积主要在龙门至河口区段(包括潼关至三门峡、三门峡至小浪底的两个峡谷水库)。河口尾间段河流周期性改道摆动,三角洲不断淤积向海洋推进。黄河干支流的水沙情况如表 1-1、图 1-1 所示。

表 1-1 2000 年黄河干支流重要控制水文站实测水沙统计结果

河流	站名	集水面积 (km ²)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (亿 t)	含沙量 (kg/m ³)	中值粒径 (mm)
黄河	唐乃亥	121 972	154. 5	0. 053	0. 34	0. 019
黄河	兰州	222 551	259. 6	0. 251	0. 97	0. 014
黄河	头道拐	367 898	140. 2	0. 284	2. 03	0. 010
黄河	龙门	497 552	157. 2	2. 190	13. 9	0. 027
黄河	潼关	682 141	186. 0	3. 410	18. 3	0. 023
黄河	花园口	730 036	165. 3	0. 835	5. 05	0. 005
黄河	高村	734 146	136. 9	1. 160	8. 47	0. 034
黄河	艾山	749 136	107. 8	0. 953	8. 84	0. 032
黄河	利津	752 032	48. 59	0. 222	4. 57	0. 029
洮河	红旗	24 973	24. 70	0. 085	3. 42	无资料
皇甫川	皇甫	3 199	0. 306	0. 091	296	0. 041
窟野河	温家川	8 645	1. 717	0. 058	33. 5	0. 013

续表 1-1

河流	站名	集水面积 (km^2)	径流量 (亿 m^3)	输沙量 (亿 t)	含沙量 (kg/m^3)	中值粒径 (mm)
无定河	白家川	29 662	6. 749	0. 285	42. 2	0. 032
延河	甘谷驿	5 891	1. 155	0. 109	94. 2	0. 024
泾河	张家山	43 216	7. 550	0. 940	199	0. 020
北洛河	湫头	25 154	5. 880	0. 340	87. 2	0. 023
渭河	华县	106 498	35. 54	1. 490	41. 9	0. 018
汾河	河津	38 728	1. 506	0. 000	0. 02	0. 093
伊洛河	黑石关	18 563	13. 61	0. 002	0. 17	0. 007
沁河	武陟	12 894	4. 044	0. 003	0. 66	无资料

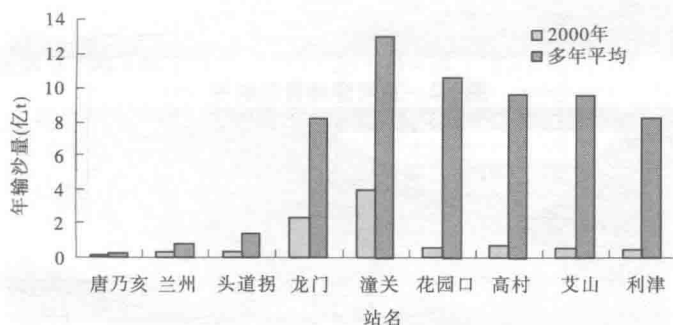


图 1-1 2000 年黄河干流重要控制水文站实测输沙量与多年平均比较

黄河流经甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西,开始与黄土并行,夏季降水到来时,千沟万壑如千万条黄龙,大量的泥沙倾泄到黄河中,使黄河成为含沙量居世界之首的泥河。

黄河在中游穿越了世界最大的黄土高原,穿行在 725 km 长的晋陕峡谷之间,泥沙越来越多,她的容颜越来越“黄”。当黄河穿过著名的“龙门”后,年均输沙量达到 10.6 亿 t,之后又接纳了汛期含沙量高的泾河、渭河、北洛河,形成黄河中下游的河段。

黄河在中下游是名副其实的“浑水河”，见图 1-2、图 1-3。



图 1-2 黄河穿越晋陕峡谷



图 1-3 含沙量高的泾河、渭河、北洛河汇入黄河

为全面了解黄河泥沙的物质组成,黄河水利科学研究院技术人员分别从黄河干流上的刘家峡、盐锅峡、青铜峡和三门峡水电站现场取样6组进行了检测。其中,考虑到河流中含沙量大小可能对物质组成的影响,在刘家峡洮河来水前后、三门峡在含沙量变化较大的不同时段分别各取了2组试样。检测工作在中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所进行。

综合上述检测结果并进行整理,得到检测结果如表1-2、表1-3所示。

表1-2 黄河泥沙的矿物含量 (%)

取样地点	矿物含量						
	石英	斜长石	方解石	云母	绿泥石	蒙脱石	其他
刘家峡1	35 ~ 40	10 ~ 15	20 ~ 25	10 ~ 15	5 ~ 10	3 ~ 5	1 ~ 2
刘家峡2	40 ~ 45	10 ~ 15	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 8	2 ~ 3	2 ~ 3
盐锅峡	35 ~ 40	5 ~ 10	15 ~ 20	20 ~ 25	5 ~ 10	2 ~ 3	1 ~ 2
青铜峡	30 ~ 35	5 ~ 10	20 ~ 25	15 ~ 20	10 ~ 15	3 ~ 5	1 ~ 2
三门峡1	20 ~ 25	5 ~ 10	25 ~ 30	10 ~ 15	15 ~ 20	5 ~ 10	1 ~ 2
三门峡2	20 ~ 25	10 ~ 15	25 ~ 30	10 ~ 15	10 ~ 15	5 ~ 10	1 ~ 2
平均	32.5	10	22.5	15	17.2	4.7	1.5

由表1-2、表1-3可以看出,由于泥沙取样范围较大,分别取自黄河上游和中游混流式水电站和轴流式水电站,故认为本次检测基本反映了黄河干流上、中游泥沙的基本特性。可以看到,黄河泥沙的矿物组成主要以石英和方解石为主。平均来看,石英和方解石在黄河泥沙中的相对含量分别达32.5%和22.5%。我们关注的石英和斜长石二者的相对含量达42.5%。

表 1-3 黄河泥沙矿物形态特征

取样地点	矿物形态特征			
	石英	斜长石、方解石	云母、蒙脱石、绿泥石	氧化铁矿物及碳质物
刘家峡 1	他形晶粒状	自形晶、半自形晶粒状, 粒度一般为 0.01 ~ 0.08 mm	片状细粒集合体	没有固定形状, 隐质或非晶质状态
刘家峡 2	他形晶粒状	自形晶、半自形晶粒状, 粒度一般为 0.01 ~ 0.12 mm	细粒片状集合体或土状集合体	隐质或非晶质状态
盐锅峡	他形晶	自形晶、半自形晶	片状集合体和细粒的土状集合体	隐质或非晶质状态, 没有固定形状
青铜峡	他形晶	自形晶、半自形晶、斜长石板状自形晶	细粒鳞片状集合体、土状集合体	不规则状结晶质或隐晶质状态
三门峡 1	他形晶	自形晶、半自形晶	片状细粒集合体	不规则状结晶质或隐晶质状态
三门峡 2	他形晶粒状为主, 粒度粗细不均	自形晶、半自形晶粒状为主, 粒度主要为 0.003 ~ 0.03 mm	片状细粒集合体大部分粒度细小, 少量集合体(片状)粒度为 0.01 ~ 0.02 mm	隐晶质或半结晶质状态

由上述检测及分析可得到如下几点认识:

(1)黄河泥沙由石英、斜长石、方解石、绿泥石、蒙脱石及氧化铁矿物、碳质物组成。

(2)黄河泥沙中的石英呈他形晶粒状,斜长石和方解石为自形晶、半自形晶,其粒度一般为 $0.01 \sim 0.12 \text{ mm}$,绿泥石和云母、蒙脱石呈细粒状集合体或土状集合体,氧化铁矿物及碳质物为隐质或非晶质状态。

(3)黄河泥沙中石英和斜长石的相对含量为 42.5% 。

(4)黄河泥沙中石英的含量由上游至中游逐渐减少:刘家峡为 $35\% \sim 45\%$ 、青铜峡为 $30\% \sim 35\%$ 、三门峡为 $20\% \sim 25\%$ 。

1.1.2 黄河流域泥沙的磨蚀特性

黄河流域上的水轮机都不同程度地受到泥沙磨蚀的危害,自上游的刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡,到中游的万家寨、天桥、三门峡、小浪底,随着河流含沙量的增加,水轮机的磨蚀程度也在增加。不同水头、不同水轮机类型,水轮机磨蚀的部位与强度也不同。高水头水电站使用低比转速水轮机,导叶区的流速相对较大,因此导叶往往成为磨蚀最严重的部件;而低水头水电站使用高比转速水轮机,转轮区的流速相对较高,转轮是磨蚀的主要部件。高水头的刘家峡水电站,导叶立面、端面的磨蚀都较严重;而低水头的八盘峡、青铜峡等水电站,转轮叶片的破坏很严重,但导叶的破坏比较轻。此外,水电站的运行方式、机组的维护策略、所采用的磨蚀防护方法与材料,均对水轮机的磨蚀有重要影响。经过几十年的不断实践与探索,各水电站都掌握了自身的泥沙与磨蚀的规律,并在磨蚀防护方面积累了丰富的经验。

黄河水利科学研究院在实验室条件下,以磁致伸缩仪和转盘

空化磨蚀仪为试验设备,选用黄河原型沙,以黄河三门峡、小浪底的实际情况为基础,选择了在不同含沙量、不同流速、不同沙粒级配的条件下,对几种不同材料的磨蚀进行了系统的试验研究,并通过试验结果的分析,找出了黄河泥沙磨蚀特性的一些基本规律。试验结果表明:在黄河原型沙条件下,金属材料磨蚀的一般规律是:失重量基本上与流速的 3 次方、含沙量的 1 次方、磨蚀时间的 1 次方、沙粒粒径的 1.2 次方成正比。关系式如下所示:

(1) 磨蚀率与流速的回归式可以表示为

$$\overline{W}_t \propto v^{2.6 \sim 3.5}$$

式中: $\overline{W}_t$ 为材料的失重率, mg/min; v 为含沙液体相对于试件的流速, m/s。

(2) 磨蚀量与含沙量的回归式为

$$W_t \propto S^{0.954 \sim 1.139}$$

式中: W_t 为磨蚀失重量, mg; S 为含沙量, kg/m³。

(3) 磨蚀量与磨蚀时间的回归式为

$$W_t \propto T^{0.9 \sim 1.067}$$

式中: W_t 为磨蚀失重量, mg; T 为磨蚀时间, h。

(4) 磨蚀量与泥沙粒径的回归式为

$$W_t = Kd^n$$

式中: W_t 为磨蚀失重量, mg; K 为与材料、含沙量、沙粒形状与矿物成分等有关的系数, 由试验确定; d 为试验泥沙粒径, μm ; n 为粒径 d 的幂, 本试验中, $n = 1.0507 \sim 1.4351$, 平均取 $n = 1.1829$ 。

1.1.3 黄河泥沙对水轮机磨蚀的影响分析

黄河上 1989 年 6 月以前投产的大中型水电站有龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡、天桥、三门峡等, 如图 1-4 所示, 共装

置 40 台机组,总容量 3 731 MW。其中,混流式水轮机 18 台,轴流转桨式水轮机 22 台。这些机组的工作水头与运行条件有较大差别,机型及材质、加工水平也各不相同。



图 1-4 黄河流域水电站分布

对各水电站水轮机的泥沙磨蚀状况分析比较,可以概括黄河上水电站的水轮机泥沙磨蚀的规律与特点。

1.1.3.1 同型号水轮机在清、浑水条件下运行,破坏特性有很大差别

清水中运行的水轮机,仅存在空蚀而无磨损,浑水中运行的水轮机则空蚀与磨损同时存在,相互促进,造成迅速的破坏。例如,装置混流式水轮机的盐锅峡水电站与双牌水电站,均装置 HL123 - LH - 410 水轮机,但破坏特征十分不同。在黄河浑水中运行的盐锅峡 1#机投产运行仅 2.5 年,叶片出水边即减薄 6 mm,呈锯齿状,叶片表面出现大面积的鱼鳞坑、沟槽及蜂窝,下环厚度损失 30 mm,导叶间隙增大 3 ~ 7 mm,上止漏环间隙由安装时的 2.8 mm 增加到 7.15 mm,叶片根部沟槽深达 20 mm。在湖南省肃水中游的

双牌水电站装有同样的机组,其水质较清,一般4~5年才需要大修一次,过流部件仅有空蚀针孔和蜂窝,不见鱼鳞坑及沟槽,每次检修也仅用焊条200 kg左右。

装置轴流式水轮机的天桥水电站与麻石水电站,均装有20世纪70年代罗马尼亚产的KVB 37-18水轮机。在黄河干流上浑水中运行的天桥水电站3#机投产运行2.5年,运行13 255 h,叶片背部外缘区域出现严重的磨蚀带,蚀坑达10~20 mm。而清水中运行的麻石水电站,同样型号的机组,运行10年后过流部件的破坏非常轻微,叶片正面、背面完好,仅在背面出水边有轻度空蚀痕迹。

1.1.3.2 同水质、同运行条件下的机组,设计参数高低不同,转轮材料及加工工艺不同时,破坏特性有很大差别

水轮机设计参数的高低对水轮机的抗磨蚀性能有重要影响。安装在天桥水电站的1#、2#机(ZZ 105-LH-530)设计参数低, $n_s=476\text{ m}\cdot\text{kW}$,而3#、4#机(KVB 37-18)设计参数高, $n_s=555\text{ m}\cdot\text{kW}$ 。运行实践证明,1#、2#机的磨蚀强度低、进程慢,2#机运行16 890 h后,叶片背部的蚀坑仅3~5 mm深;而高参数的3#机,运行13 255 h后,叶片背部的蚀坑达10~20 mm,磨蚀强度是低参数机组的3~4倍。

转轮材料与加工工艺对水轮机的磨蚀性能影响很显著。装置在八盘峡的3#~5#机,是瑞典KMW工厂的产品,转轮叶片、转轮室均为不锈钢整铸,叶片翼型误差小,表面光洁度高,叶片出水边误差仅0.2~0.3 mm,叶片与转轮室的间隙仅2.5 mm;而国产的1#、2#机,叶片母材为ZG20SiMn,叶片正面和背面不同部位铺焊了不锈钢,但叶片表面粗糙。虽然这5台机组设计参数相近,但磨蚀程度却有很大差别。瑞典机组运行25 000 h后,仅在叶片头部有200 mm×250 mm的8~10 mm深沟槽,其余部位完好;而国产1#