

BIAOMIAN GONGCHENG YU ZAIZHIZAO JISHU

—SHUILI JIXIE JI

SHUILI JIXIE JI JINSHU JIEGOU BIAOMIAN XINJISHU

表面工程与再制造技术 ——水力机械及 水工金属结构表面新技术

吴燕明 陈小明 周夏凉 毛鹏展 方 勇 等著



黄河水利出版社

表面工程与再制造技术

——水力机械及水工金属结构表面新技术

吴燕明 陈小明 周夏凉 毛鹏展 方 勇 等著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书主要从水力机械及水工金属结构表面失效机制、水力机械及水工金属结构表面新技术的发展以及热喷涂纳米涂层、激光熔覆涂层的性能研究与应用等方面,对水力机械及水工金属结构表面新技术的研究与应用进行了系统的阐述。通过对超音速火焰热喷涂纳米 WC、超音速等离子热喷涂 CRO 涂层、电弧喷涂纳米非晶粉芯涂层及激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基涂层的相关配方和工艺的深入研究,实现对水力机械及水工金属结构表面耐磨蚀、耐腐蚀、抗磨损等性能要求,有效解决水力机械及水工金属结构因磨蚀、腐蚀、磨损等导致的失效和使用寿命短等问题,大幅提高水力机械及水工金属结构性能与寿命。

本书可为相关行业工程技术人员和科研工作者提供有益参考,也可供相关专业的大学生本科生和研究生使用和参考,并可为有关决策提供科学依据。

图书在版编目(CIP)数据

表面工程与再制造技术:水力机械及水工金属结构
表面新技术/吴燕明等著. —郑州:黄河水利出版社,
2018. 6

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1944 - 0

I. ①表… II. ①吴… III. ①水力机械 - 金属表
面处理 ②水工结构 - 金属结构 - 金属表面处理
IV. ①TV131. 63 ②TV34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 320285 号

书 名:表面工程与再制造技术——水力机械及水工金属结构表面新技术
作 者:吴燕明 陈小明 周夏凉 毛鹏展 方 勇 等著
出版发行: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
发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)
E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南瑞之光印刷股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9.25

字数:170 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 6 月第 1 版

印次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定价:39.00 元

前 言

我国拥有丰富的水利资源,水力机械与水工金属结构的安全、长久的运行对于水利资源的开发利用至关重要。然而,许多水力机械与水工金属结构在运行使用过程中面临着严重的磨蚀、空蚀、腐蚀等问题,明显缩短了水力机械与水工金属的使用寿命,甚至威胁水利工程的运行安全。如水轮机、水泵等,在泥沙河流中使用存在严重的磨蚀、空蚀等问题,导致水轮机、水泵等设备工作效率降低,出力下降甚至失效,带来严重的经济损失和资源浪费。如何解决水力机械与水工金属结构面临的表面失效问题,延长设备使用寿命,是我们迫切需要解决的关键技术问题。

随着现代工业的高速发展,表面工程与再制造技术已成为不可或缺的关键技术之一。它能大幅提高机械零件性能,使其能够在高速、高温、高压、重载、冲击、磨损、磨蚀及腐蚀等工况下可靠、持续运行,大幅延长机械零部件寿命。还可以运用它对废旧机械零部件进行再制造,使其获得新的生命,实现节能减排,减少环境污染。因此,表面工程与再制造技术在各个行业得到高度的重视和迅速的发展。

水利部杭州机械设计研究所(又名水利部产品质量标准研究所),致力于利用表面工程与再制造技术解决水力机械及水工金属结构的关键技术难题,拥有“浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室”和“水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室”。它主要在材料配方与热喷涂、激光强化技术等方面开展设备及工艺关键技术研究与应用。经过十多年不断研究,取得了一系列科研成果,在适用于不同要求的高性能配方、超音速等离子喷涂、超音速电弧热喷涂、高超音速火焰喷涂、爆炸喷涂、激光强化技术以及喷枪关键技术等方面拥有多项自主知识产权,大幅提高了涂层的性能,并且已被广泛应用于水利水电、机械制造等行业领域。

为解决水力机械与水工金属的失效问题,人们开展了大量的研究工作。近年来,随着技术的发展,表面工程技术、再制造技术和纳米材料技术等为延长水力机械与水工金属的使用寿命提供了新的途径和方法。鉴于以上关键技术问题,我们专门针对水力机械及水工金属结构表面新技术进行了系统研究,获得了大量有实际应用价值的数据和一系列研究成果,在此基础上,结合国内外同行的有关文献资料,撰写了《表面工程与再制造技术——水力机械及水

工金属结构表面新技术》一书。该书可为相关行业工程技术人员和科研工作者提供有益参考,也可供相关专业的大学本科生和研究生使用和参考,并可为有关决策提供科学依据。

本书主要从水力机械及水工金属结构表面失效机制、水力机械及水工金属结构表面新技术的发展以及热喷涂纳米涂层、激光熔覆涂层的性能研究与应用等方面,对水力机械及水工金属结构表面新技术的研究与应用进行了系统的阐述。通过对超音速火焰热喷涂纳米 WC、超音速等离子热喷涂 CRO 涂层、电弧喷涂纳米非晶粉芯涂层及激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基涂层的相关配方和工艺的深入研究,实现对水力机械及水工金属结构表面耐磨蚀、耐空蚀、抗污损等性能要求,有效解决水力机械及水工金属结构因磨蚀、空蚀、腐蚀、污损等导致的失效和使用寿命短等问题,大幅提高水力机械及水工金属结构性能。

本书共分为九章,主要内容有:绪论、水力机械与水工金属结构的表面失效问题、水力机械与水工金属结构表面新技术、涂层材料配方设计、微纳涂层的测试方法、热喷涂纳米 WC 基抗磨蚀复合涂层研究与应用、热喷涂 CRO 基抗磨损与腐蚀涂层研究与应用、热喷涂纳米非晶粉芯不锈钢抗腐蚀涂层研究与应用、激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金抗空蚀复合涂层研究与应用。全书由吴燕明统稿,其中,第 1 章由赵坚、陈小明撰写;第 2 章由毛鹏展、周夏凉撰写;第 3 章、第 5 章由周夏凉、陈小明撰写;第 4 章、第 6 章由吴燕明、陈小明撰写;第 7 章由伏利、王莉容撰写;第 8 章、第 9 章由刘伟、方勇撰写。

在本书的撰写过程中,得到了许多专家学者以及同事的大力支持和帮助,在此特向他们致以真诚的感谢。本书在撰写过程中参考和引用了一些国内外同行的文献资料,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

本书的研究得到了水利部“948”计划(项目编号:201218)、浙江省科技计划项目(项目编号:2014C31156、2016C37091、2017C37048)、水利部综合事业局拔尖人才项目、杭州市科技发展计划项目(项目编号:20162231E10)、杭州市西湖区十大科技专项(115411N007)、浙江省水利水电装备表面工程技术研究重点实验室基金项目(2017syjj16)、水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室自主创新项目(2015STR01、2015STR05)等的大力资助,在此表示感谢。限于作者的研究水平,书中难免存在疏漏之处,敬请同仁批评指正。

作者

2017 年 10 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 水力机械与水工金属结构表面技术研究背景与意义	(1)
1.2 水力机械与水工金属结构表面技术发展历史	(10)
1.3 水力机械与水工金属结构表面技术现状与发展趋势	(15)
第2章 水力机械与水工金属结构的表面失效问题	(21)
2.1 概 述	(21)
2.2 水力机械空蚀	(22)
2.3 水力机械磨蚀	(27)
2.4 水工金属结构腐蚀	(32)
2.5 水工金属结构腐蚀主要部件	(34)
第3章 水力机械与水工金属结构表面新技术	(35)
3.1 纳米技术	(35)
3.2 超音速火焰喷涂技术	(40)
3.3 等离子热喷涂技术	(45)
3.4 超音速电弧喷涂技术	(50)
3.5 激光强化技术	(52)
第4章 涂层材料配方设计	(55)
4.1 涂层配方体系	(55)
4.2 纳米技术在涂层材料配方中的应用	(58)
4.3 配方的制备方法	(59)
第5章 微纳涂层的测试方法	(61)
5.1 微纳涂层力学性能测试方法	(61)
5.2 微纳涂层微观结构测试分析方法	(64)
5.3 微纳涂层微区成分测试分析方法	(67)
5.4 微纳涂层腐蚀特性测试分析方法	(70)
第6章 热喷涂纳米 WC 基抗磨蚀复合涂层研究与应用	(72)
6.1 方案设计	(72)

6.2	纳米 WC 基涂层性能与微观组织分析	(76)
6.3	纳米 WC 基涂层的应用	(94)
6.4	小 结	(95)
第 7 章	热喷涂 CRO 基抗磨损与腐蚀涂层研究与应用	(97)
7.1	试验材料及方法	(98)
7.2	CRO 基涂层微观组织与性能研究	(101)
7.3	工艺对涂层性能的影响分析	(109)
7.4	CRO 基涂层的应用	(110)
7.5	小 结	(112)
第 8 章	热喷涂纳米非晶粉芯不锈钢抗腐蚀涂层研究与应用	(113)
8.1	方案设计	(114)
8.2	纳米非晶粉芯不锈钢涂层性能与微观结构研究	(118)
8.3	纳米非晶粉芯不锈钢涂层的应用	(124)
8.4	小 结	(126)
第 9 章	激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金抗空蚀复合涂层研究与应用	(127)
9.1	研究方案	(127)
9.2	Fe 基/Ni 基/Co 基合金的结构与性能	(128)
9.3	小 结	(132)
参考文献		(133)

第1章 绪论

1.1 水力机械与水工金属结构表面技术研究背景与意义

水力机械主要包括以下几类:水轮机、水泵及水泵水轮机等,是用于水流能量和机械能(或其他能量)之间转换的机械设备。水轮机作为水电站主要动力设备,可将水能转为机械能。水泵主要用途是输送液体或者使液体增压,它可将机械能或其他外部能量传送给液体,使液体能量增加,以对液体进行距离或高度的传输。水泵水轮机是一种可逆式水力机械,转轮正向旋转时可作为水泵使用,反向旋转时可作为水轮机使用。水工金属结构主要用于实现对防洪和灌溉等的控制,主要包括:钢结构、压力钢管、水工闸门、启闭机等。

水力机械及水工金属结构是水力资源开发利用、农田水利建设、生态环境保护与治理中不可缺少的关键部分,其使用稳定性及寿命直接关系到水利工程的运行安全、人民生命及财产安全。然而,在水力机械及水工金属结构的服役过程中,其表面会受到如泥沙磨蚀、空蚀、腐蚀、疲劳等环境带来的侵蚀破坏,引起表面材料失效,工作不稳定甚至报废等情况,明显缩短设备使用寿命,严重威胁水利工程的运行安全,带来巨大的经济损失。因此,开展水力机械及水工金属结构的表面防护新技术研究具有重要的理论与现实意义。

1.1.1 水力机械表面技术研究背景与意义

1.1.1.1 水轮机表面失效现状

我国水利资源相当丰富,现有的水电站数量和装机容量均居世界首位。据有关统计,我国共有水电站 46 758 座,总装机容量 33 288.93 万 kW。其中,装机容量在 500 kW 以上的水电站达 22 190 座,总装机容量为 32 729.79 万 kW;规模在 500 kW 以下的水电站达 24 568 座,总装机容量为 559.14 万 kW。在以上规模的电站中,大型水电站数量为 142 座,总装机容量为 20 663.96 万 kW;中型水电站数量为 477 座,总装机容量 5 242 万 kW;小型水电站数量为 21 571 座,总装机容量为 6 823.83 kW。

我国的河流普遍具有含沙量大的特点,其中年平均输沙量在 1 000 万 t 以上的河流约有 115 条,如黄河及其支流、大渡河、岷江、金沙江、澜沧江、红河、长江及其部分支流等。其中黄河的含沙量最大,年平均输沙量达 16 亿 t,汛期最大含沙量高达 941 kg/m^3 ,而且粗颗粒泥沙比例高,粒径大于 0.05 mm 的泥沙约占泥沙总量 25%。

因此,我国的水轮机面临的泥沙磨损最突出,每年因泥沙磨损、磨蚀、空蚀等原因造成的经济损失高达几百亿元。在全国水电站水轮机中,出现中等以上磨蚀危害的机组容量约占总容量的 30% 以上,特别是黄河干流大中型水电站,其水轮机中受到磨蚀的机组容量占总容量的 60% 以上。

磨蚀、空蚀、腐蚀等问题会引起水轮机机组的运行效率大幅下降,并大幅缩减机组运行寿命,导致检修周期缩短,增加了检修工作量及维修费用。大型水电站水轮机因受磨蚀、空蚀、腐蚀等原因引起运行效率下降 1.5% ~ 8%;中小型水电站水轮机因受磨蚀、空蚀、腐蚀等原因引起运行效率下降 3% ~ 10%。以黄河三门峡水电站为例,由于磨蚀和冲蚀问题,其水轮机在运行 15 000 h 后必须进行扩修,其中 4[#]水轮机运行 2 年后过流部件严重磨损,运行效率下降 8.7%,而一般清水中,电站大修期约 5 年,维修周期明显大于黄河水域电站。

目前,水电站水轮机种类主要包括:混流式、轴流转浆式、灯泡贯流式、轴伸贯流式、冲击水斗式等。水轮机结构图如图 1-1 所示。

1.1.1.2 水泵表面失效现状

我国机电提灌泵站数量为 50 多万座,可灌溉面积约达 0.3 亿 hm^2 ,其中大型泵站约有 450 处,其泵站数量约为 5 250 座、装机数量约达 24 500 台。这些泵站在跨流域调水、抗旱保收、促进农业生产和地方经济发展中起到了非常重要的作用。如我国的南水北调工程,其输水线总长度为 1 150 km,其上建有泵站 37 座,总装机容量达 103 万 kW。然而,这些泵站的水泵普遍存在着不同程度的空蚀问题,尤其是大、中型水泵,空蚀现象比较严重。再加上我国河流的泥沙含量较高,使得其中约 40% 泵站又存在严重的磨蚀问题,如在黄河流域上,扬程超过 100 m、灌溉面积在 667 hm^2 以上的大型提灌工程达 60 多座,由于黄河水流含沙量大,这些工程中的水泵受到严重的磨蚀侵害。

水泵运行过程引起的空蚀较为普遍,空蚀是由于水中气泡破裂而对金属叶片产生冲击,造成表面产生凹痕,凹痕导致液体对金属表面应力的集中,并进一步破坏叶片以及泵体表面。水泵在高泥沙河流中运行,抽送液体中含有大量的泥沙颗粒,引起严重磨损,导致水泵叶片、口环等部件的使用寿命大幅

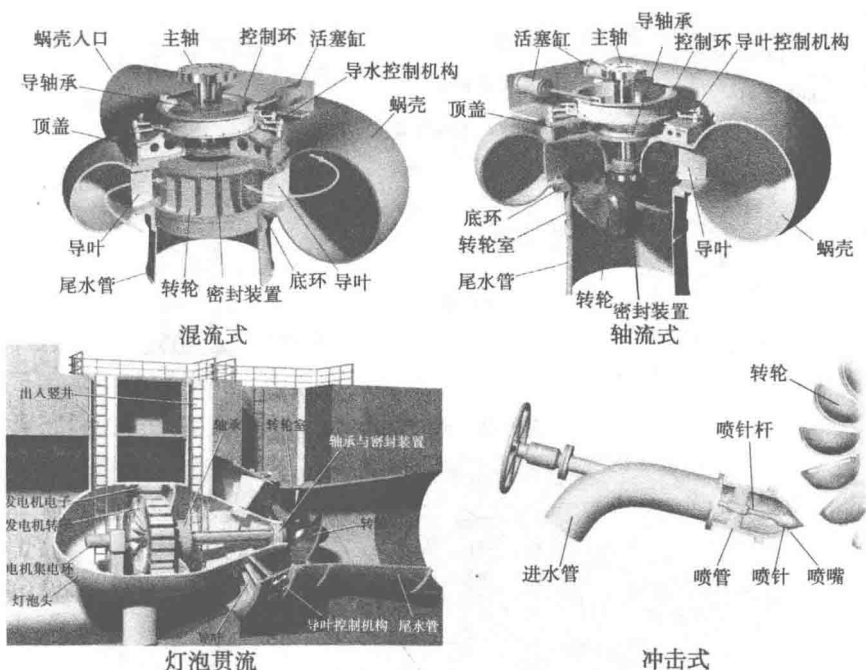


图 1-1 水轮机结构图

度降低,还引起叶片与叶轮室之间间隙变大,导致水泵工作效率明显降低,出水量大幅减小。同时,由于沙粒磨损的不均匀性,使得磨损后叶轮转子的质量不平衡,加剧了泵机组的振动,造成检修频率增高。如引黄泵站水泵磨损、空蚀问题严重威胁泵站运行安全。河南邙山泵站、山西夹马口电灌站、陕西东雷抽黄工程等泵站都存在严重的磨损、空蚀等问题。

目前,水泵种类主要有离心泵、轴流泵、混流泵等。水泵结构图如图 1-2 所示。

1.1.1.3 水轮机及水泵过流部件表面的主要失效形式

对于水轮机、水泵而言,过流部件受到环境引起的破坏最为严重,如水轮机的转轮、导叶、顶盖、底环、喷针等;水泵的泵体、叶轮、泵轴、口环等。水轮机及水泵的过流部件在高泥沙水流中所受到的主要破坏形式为泥沙冲蚀、气泡空蚀、水环境腐蚀等。某水轮机的转轮叶片磨蚀图,如图 1-3 所示。往往这几种破坏形式同时存在并且交互作用,这会对过流部件造成进一步破坏。

(1) 泥沙冲蚀

当高速的含泥沙水流流经水力机械时,其过流部件表面不断受到来自沙

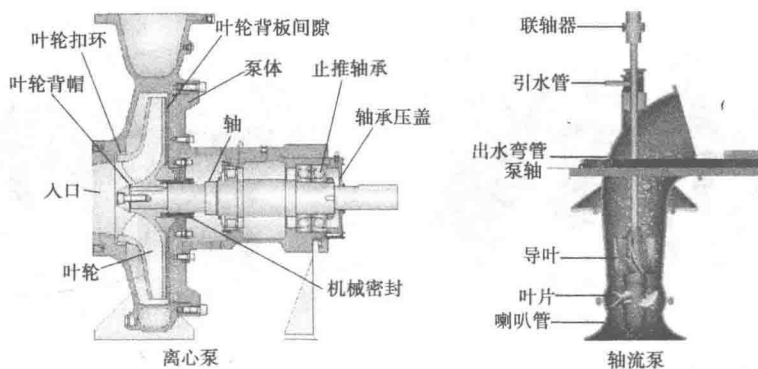


图 1-2 水泵结构图



图 1-3 某水轮机的转轮叶片磨蚀图

粒的冲击和切削作用,造成过流部件的破坏。某水轮机过流部件冲蚀图,如图 1-4 所示。由于泥沙的大小、硬度、冲击角度等不同,再加上水流的随机性和脉动性等特点,造成过流部件的破坏程度各有不同。有的如研磨一样使过流金属表面光滑如镜的轻微破坏,有的如过流金属表面磨削加工样的规则或不规则的鱼鳞坑或凹凸的沟槽的严重破坏,更严重时过流金属表面出现无规律的一个个深坑,并伴有锋利的金属刃口,导致过流部件报废。

曾经有学者对于泥沙冲蚀的破坏机制提出过有害粒径的概念,如苏联 A. N 佛列克西尔,通过对高加索地区高水头水电站运行观测资料的分析总结,提出了粒径大于 0.05 mm 的泥沙为有害泥沙,说明冲蚀与泥沙粒径大小有着相应关系。此后,苏联 B. S 杜里涅夫进一步提出,当沙粒粒径小于 0.05 mm 时,磨损强度差异较小,而沙粒粒径为 0.1 ~ 0.5 mm 范围内,冲蚀随着泥沙粒径的增大而变严重。国内也有研究表明,在水流流速小于 17 m/s 时,泥沙粒径小于 0.05 mm 的条件下,试件表面无明显磨损;但当流速达到 52 m/s

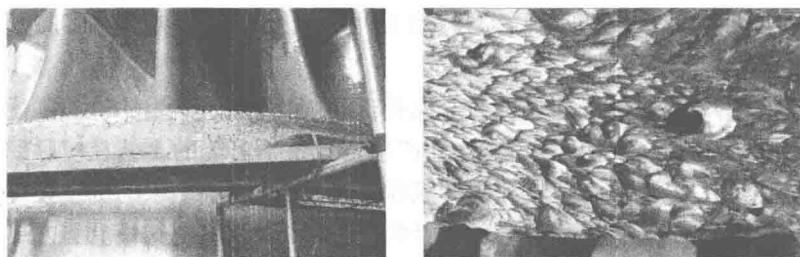


图 1-4 某水轮机过流部件冲蚀图

时,含沙量为 0.77 kg/m^3 ,泥沙粒径为 0.01 mm 的条件下,浑水空蚀是相同工况下清水空蚀的 $4 \sim 7$ 倍,说明在高水头电站或高扬程泵站中,由于水流相对过流部件的流速较大,即使泥沙粒径较小,冲蚀较轻,但仍存在严重的空蚀破坏。

根据 Finnie 的微切削理论,材料冲蚀失重可由下式表示:

$$W \approx (C \cdot M^2 / \sigma_s) \cdot f(\alpha) V^n$$

式中, W 为冲蚀失重; C 、 n 为常数; M 为冲击粒子的总质量; $f(\alpha)$ 为与冲蚀角有关的函数; V 为冲击速度; σ_s 为材料屈服应力。

从 Finnie 微切削理论可以看出,材料冲蚀失重与泥沙的粒径和流速的平方成正比,与材料的屈服应力成反比。对于冲蚀角的影响,一般在垂直于过流部件表面的情况下对过流部件造成打击力最大。但由于材料的不同,沙粒的切削作用有所区别:水力机械过流部件一般采用 ZG0Cr13Ni5Mo 等高强度不锈钢,属于塑性金属材料,其在低冲蚀角的冲蚀率有一峰值,随着冲蚀角的增大,冲蚀率有所下降,一般认为在与过流部件表面成 45° 角时冲击率最大;而对于铸铁等脆性较大的材料,冲蚀角增大,冲蚀率随着增大,当冲蚀角为 90° 时,冲蚀率达到最大。

我国含沙河流的泥沙粒径普遍较大,比如黄河中粒径大于 0.05 mm 的泥沙约占泥沙总量的 25% ;新疆、四川等流域不仅泥沙粒径较大,而且水头都较高,一般为 $200 \sim 300 \text{ m}$,因而都会造成较为严重的泥沙冲蚀问题。

(2) 气泡空蚀

在静止的与流动的液体中,当压力下降到一定程度时,液体内部会发生体积破坏,进而产生气泡,这一物理现象称为空化。空化只发生在液体中,在以水为介质的水力机械中,由于某些流通部位的流速较高、压力较低,极易产生空化。对应发生空化状态的压力称为空化压力。当气泡移至压力较高的位置,会重新崩解,产生微观冲击压力。当大量气泡在固体构件表面附近崩解

时,会对固件表面产生长时间的高频微观冲击,使材料发生疲劳破坏,这种破坏称为空蚀。

研究表明,纯水的抗拉强度与金属相近,纯水的分子产生的抗拉强度超过数千大气压。因此,要使纯水破坏,即产生空化是不可能的。但在实际的天然水中,还含有一定数量的空气和固体颗粒,因而大大降低了水的抗拉强度。由于各种原因,水中这些介质会形成大量的、肉眼难以辨识的气核。当水中压力降低至某一空化压力时,气核膨胀发生空化。在清水中,空气含量为1.8% ~ 2.0%,而当水中含沙量达 8 kg/m^3 时,每立方厘米含沙水中的气核比清水时约多几百万个。因此,水中泥沙含量越高,越容易发生空化,乃至空蚀。

如果水力机械过流部件表面发生气泡崩解,由于持续性的微观冲击的作用导致部件表面产生疲劳破坏。此外,在气泡崩解的过程中,还伴随着温度升高、放电、发光和化学腐蚀等现象的发生,从而加速了部件表面破坏的进程。由于水流在这种条件下连续不断地流动,使得蒸汽空泡形成和溃灭以很高的频率在连续进行,最终导致过流部件表面破坏,严重时可出现局部材料的空蚀穿孔或缺口,同时空蚀空泡的形成、脉动和溃灭过程又会导致机组振动和产生噪声,使得机组效率明显下降。某水轮机过流部件空蚀图,如图 1-5 所示。

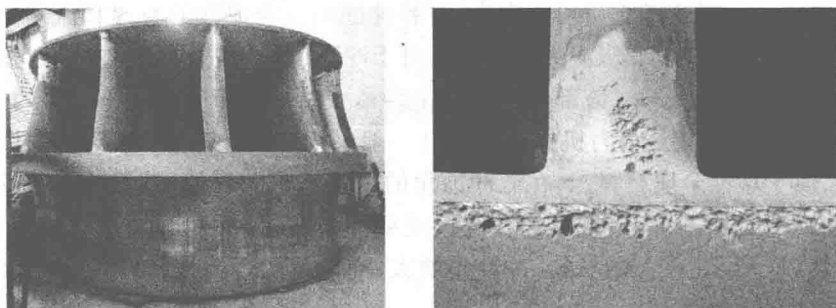


图 1-5 某水轮机过流部件空蚀图

1.1.2 水工金属结构表面技术研究背景与意义

在我国已建成的水利水电工程中,已安装的水工金属结构约有 1 000 多万 t,价值达 400 多亿元。这些钢结构构件担负着输水、防洪、排涝与灌溉等重要任务,是水利工程的重要组成部分。由于长期处于侵蚀性介质中,这些金属结构不仅遭受着一定的电化学侵蚀,同时还受到高速水流和风浪的冲击,以及泥沙、冰凌的磨损,引起一些水工金属结构遭受严重破坏。如水工钢闸门等发生锈蚀后,其钢结构承载强度大幅降低,腐蚀严重时,甚至会危及工程安全;闸

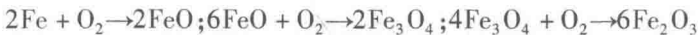
门启闭机活塞杆表面发生腐蚀和磨损后,会导致闸门运行困难,甚至出现无法正常开闸的情况,严重危害工程安全。因此,亟须开展水工金属结构表面技术的研究,研发解决其腐蚀、磨损的新技术,从而确保工程安全运行,减少因腐蚀及磨损所造成的损失。

1.1.2.1 水工金属结构的失效类型

在服役过程中,水工金属结构表面遭受的侵害作用主要包括以下几种类型:电化学腐蚀、环境腐蚀、细菌腐蚀、泥沙等硬物磨损、生物污损等。

(1) 电化学腐蚀

水工钢闸门等的腐蚀多为电化学腐蚀。金属(如钢铁)与外部介质发生电化学反应,主要是通过电子得失,形成电流来完成的。电化学腐蚀的定义:不同金属在电解质中接触,或同一金属侵入电介质中,其金属表面局部部位的电极电位有所不同,进而产生电位差,发生阳极反应和阴极反应,并伴有电子转移的腐蚀过程,阳极腐蚀而阴极得到保护。电化学腐蚀的三要素:①金属表面存在电极电位差;②阴极与阳极间具有良好的接触;③阴极与阳极处在互相连通的介质中。主要发生的电化学反应式如下:



刚开始时金属表面发暗,轻锈呈暗灰色及黑色(FeO 、 Fe_3O_4),进一步发展成褐色或棕黄色(Fe_2O_3),严重的呈棕色或褐色疤痕,或出现锈坑。通常是这三种氧化物和水共存的情况,即 $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。

(2) 环境腐蚀

暴露在大气中的金属结构,遇到空气中的氧气和水汽,就会引起结构表面的腐蚀。如果空气相对湿度达到70%以上,并且空气中含少量酸性杂质 SO_2 等污染物的情况下,腐蚀会加重。金属结构的尺寸、形状及朝向均在一定程度上影响其腐蚀速率。铁锈是金属结构腐蚀过程的产物,其体积比生成它的金属铁的体积更大,对于金属板来说,在缝隙或重叠处生锈时会引起金属板翘曲,在涂层膜下生锈会导致涂层起泡或者裂开。水工金属结构多数处于水下或水位变动区,其腐蚀明显受到水中含氧量的多少的影响。在无氧条件下,一般不会发生水腐蚀。由于水环境本身很复杂,在水下多发生磨蚀、冲击和空蚀。金属结构在水中的腐蚀一般是均匀的,但由于水流速的影响,金属表面会发生很严重的点腐蚀。

(3) 细菌腐蚀

细菌腐蚀是当金属在含有硫酸盐的土壤中腐蚀时,阴极反应的氢将硫酸盐还原为硫化物,硫酸盐还原菌利用反应的能量进行繁殖,从而加速金属腐蚀

的现象。如果金属结构所处的环境中存在硫酸盐还原菌,那么金属结构的腐蚀会在无氧条件下进行。这种细菌存在于黏土、泥浆、淤泥以及海水中,带有明显的硫化物气味,会在金属表面产生黑色的腐蚀产物。如果涂层有孔隙或被破坏,那么细菌会对金属结构起到破坏作用。某水工金属管路腐蚀图,如图 1-6 所示。



图 1-6 某水工金属管路腐蚀图

(4) 泥沙等硬物磨损

水工金属结构在运行时会受到泥沙等硬质颗粒的冲刷及磨损,首先会导致防护涂层的损坏,使得金属结构基材表面暴露在腐蚀环境或腐蚀介质中,加剧腐蚀;还会导致金属结构局部变薄,甚至破损,危及水利工程的运行安全。

(5) 生物污损

生物污损过程可分为四个部分,分别是条件膜形成、微生物膜形成、原生动物附着以及污损生物附着。最先附着的微生物会增加金属材料表面的粗糙度和疏水性。细菌通过产生多糖、蛋白质、核酸和脂类,形成的胞外基质将自己包裹而保护起来。这种微生物保护膜一旦形成很难清除,并且会进一步引导贝类等生物附着。生物污损是不可逆的,给水利工程带来巨大的经济损失和安全隐患。如沼蛤在水电站冷却管系统内大量生长、高密附着,形成生物污损侵害,不仅对水工金属结构表面造成腐蚀破坏,缩短使用寿命,还会堵塞管道,甚至造成机组关闭,威胁电站的运行安全。某水工金属结构表面生物污损图,如图 1-7 所示。

1.1.2.2 水工金属结构的失效

(1) 水工闸门表面失效

全国拥有水工闸门近 10 万座。闸门一般会进行油漆防腐等处理,但水工

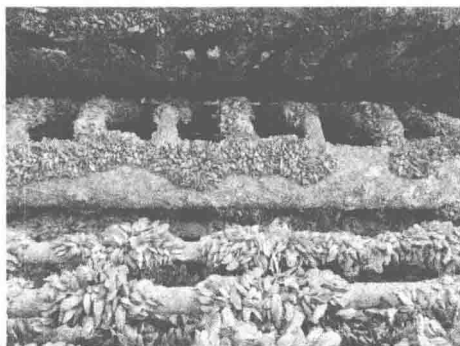


图 1-7 某水工金属结构表面生物污损图

钢闸门由于所处环境恶劣,常常遭受因水污染而引起的腐蚀和阳光、水气、尘埃、盐雾、水生物、泥沙等的侵蚀,一般运行 3~5 年就会出现漆膜脱落,门面出现腐蚀和磨损现象,甚至造成报废;同时,闸门的门槽还普遍存在气蚀和磨蚀破坏。这些因素共同造成了我国闸门“十闸九漏”的局面,严重危及水利工程的安全运行。某水工闸门腐蚀破坏图,如图 1-8 所示。

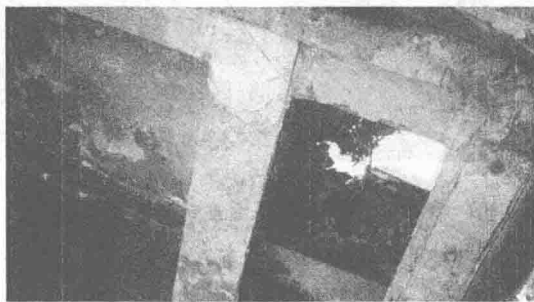


图 1-8 某水工闸门腐蚀破坏图

在高泥沙含量流域中运行的闸门普遍存在较为严重的磨损问题,同时磨损会将闸门表面的漆膜等保护层磨去,加剧了闸门腐蚀。如小浪底明流洞工作闸门和排沙洞偏心铰弧形闸门,其面板均存在泥沙磨损造成表面漆膜破坏的情况,造成防腐周期大幅缩短,加大了防腐检修管理和维护费用,并且磨损、腐蚀及频繁的防腐喷砂会对闸门基材产生较强的破坏,使闸门面板变薄,缩短闸门的使用寿命,危及闸门的运行安全。

(2) 启闭机活塞杆表面失效

液压启闭机被广泛应用于水利工程等领域,是重要的工程设备,活塞杆是启闭机系统中的重要组成部分。其失效形式主要为表面严重的划痕及锈蚀。

由于其使用环境一般为露天的水利工程,并且液压启闭机的活塞杆在闸门关闭时一般是伸出缸体的,此时活塞杆直接暴露于空气中。随着长时间使用,环境中的砂粒等杂物会吸附在活塞杆表面并进入缸体内,砂粒等杂质在活塞杆的使用过程中会在其表面形成划痕等损伤,同时环境中的水气等还会对活塞杆表面造成腐蚀,这将严重影响活塞杆的使用性能并加速缩短其使用寿命。近年来,一些水利工程液压启闭机使用不久,有的还在质保期内就出现了活塞杆锈蚀,其腐蚀后引起密封的破坏、卡死,以致无法使用,不得不更换活塞杆。某水工闸门启闭机活塞杆腐蚀图和磨损图,如图 1-9 所示。

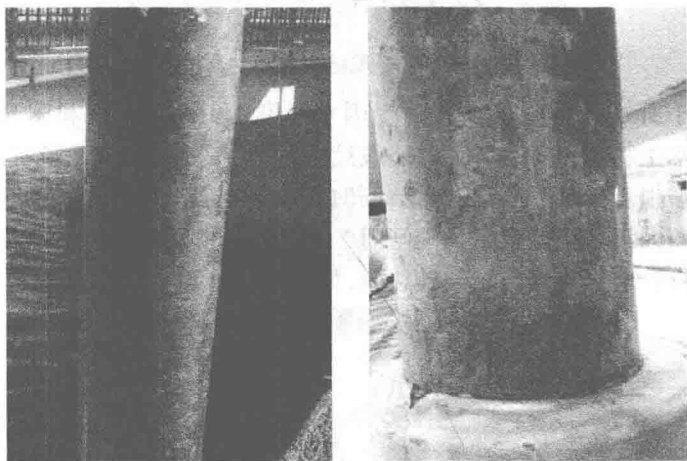


图 1-9 某水工闸门启闭机活塞杆腐蚀图和磨损图

1.2 水力机械与水工金属结构表面技术发展历史

水力机械磨蚀问题及水工金属结构磨损、腐蚀问题长期以来都是困扰和阻碍其发展的关键技术问题,亟须研究和解决。近几十年来,国内外的专家学者、科研机构以及相关企业在一直努力寻求解决方法,不断研发出新的表面防护技术,使得水力机械与水工金属结构表面防护技术得到了较快的发展。

1.2.1 水力机械表面技术发展历史

1.2.1.1 金属焊条堆焊

金属焊条堆焊是水力机械过流部件(如转轮、导叶、顶盖、底环等),普遍采用的修复和抗磨防护方法。这种方法堆焊层硬度高,抗泥沙磨损能力强,且