

# 水轮机沙粒磨损

段昌国 编著



清华大学出版社

# 水轮机沙粒磨损

(流体力学磨粒磨损及其水轮机应用)

---

段昌国 编著

—— 清华大学出版社 ——

## 内 容 提 要

本书分析了流体动力学自由磨粒磨损的机制和基本特性,论述了水轮机沙粒磨损的基本特征和提高其耐磨性的各种途径。并较为广泛地讨论了各种抗磨蚀防护方法,以及做为抗磨材料使用的金属材料、工程塑料、陶瓷、高硬烧结合金、刚性聚合物复层和弹性橡胶复层的抗磨蚀特性和使用情况。

本书在保持课题论述系统性的基础上,较为广泛地涉及了国内外的近期研究情况。

本书可供电力、机械、冶金、矿山等工业领域中,有关水轮机、水泵、杂质泵及其它固液两相介质输送装置的专业设计、制造、科研、运行方面的技术人员参考,并可做为有关专业大学生和研究生的教学参考书。

## 水 轮 机 沙 粒 磨 损

段昌国 编著



清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

北京东城区印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售



开本: 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张: 15<sup>18</sup>/<sub>32</sub> 字数: 349 (千字)

1981年10月第一版 1981年11月第一次印刷

印数 1~3000 统一书号: 15235.22

定价: 平装 2.25 元 精装 3.00 元

# 序

---

对于以含有固体颗粒的两相流体为工作介质的机械和设备,被流体挟运的固体颗粒通过其流道时,可以造成流道边壁的材料损失,即,产生流体动力学磨粒磨损。这类机械在国民经济许多部门中采用。例如,在含沙水流中工作的水轮机、抽送含沙水或泥浆的水泵、输送各种固体杂质颗粒的杂质泵、各种流体输送(固体颗粒)系统的有关机械设备、气动喷砂机械,以至火箭发动机喷咀和直升飞机浆叶等。因此,流体动力学磨粒磨损是对国民经济有广泛影响的重要研究课题之一。

特别是,我国有不少多泥沙河流,它们具有远远超过世界上任何其它河流的含沙量。因此,在其上取水工作的水轮机和水泵的流体动力学磨粒磨损问题(简称沙粒磨损)十分严重。实际运行经验表明,这些水轮机和水泵磨损速度相当快,从而导致效率严重下降,检修频繁,正常运行难以维持,造成巨大的经济损失。

近年来,鉴于生产上的迫切需要,国内对此问题开展了大规模的研究工作;各生产单位积累了一定的经验;高等学校有关专业也开设了有关此课题的课程。但值得注意的是,迄今为止,尚未出版过任何一本有关这一课题的国内的专门著作。相对于我国水力机械沙粒磨损问题的特殊严重性,这就显得极不相称。有鉴于此,作者基于自1963年首次开设有关此课题的课程以来的历届教材,加以修订,编写了本书。

本书力求论述的系统性。由于水轮机沙粒磨损是流体动力学磨损学科中的一个具体问题，故在本书中首先系统地阐述了流体动力学磨粒磨损的基本理论及其一般规律。然后，在此基础上引伸到水轮机磨损的特点和具体问题。为求本书的实用性，也用较多篇幅讨论了提高部件抗磨性的各种方法和途径。作者还力求本书论点和资料的广泛性。由于，在水轮机沙粒磨损研究领域，对某些问题存在着一些对立的看法和互相矛盾的实验资料。为使读者有一个更广的视野，在阐述这些问题的主流观点的同时，也尽量广泛地对其它观点和资料给以扼要介绍，并加以作者的评论。考虑到有关此课题的研究资料多年来未曾做过系统介绍，作者觉得，在本书中保持学科系统性和尽量广泛地介绍国内外研究成果是必要的。

作者期望本书对水轮机沙粒磨损以及流体动力学磨粒磨损的各方面课题的科研、生产和教学工作能稍有助益。但作者水平所限，本书谬误之处恐在所难免，因而希望得到读者的指正。作者通讯处是：北京，华北水电学院北京研究生部。

电力部科技委郭中兴工程师，水利部天津勘测设计院刘燕生高级工程师、华东水利学院刘大恺副教授和水电科学研究院刘家麟工程师曾对本书原稿作了详细的审阅和修改。作者在此向他们，以及在本书中引用了其有关资料的列于参考文献中的国内外各位作者表示衷心感谢，恕不一一指出。

最后，作者还想借此机会向对作者的研究工作给予关心和支持的有关领导机关、水电部、部科技委和水电学院的一些领导和同志们深致谢意。

作 者

1981年7月15日于北京

## Preface

In a series of sectors of the national economy, there are a great many kinds of machines and equipments which work in the two-phase fluid including the solid particles and suffer the hydrokinetics particle erosion. In our country, for there are many few rivers which possess the largest silt content in the world, the problem of turbine silt abrasive erosion has become even more serious.

Within the last two decades, a larger scale of research in this field has been carried out in our country and many advances have been made.

The book is based on the teaching materials of all previous years since the author gave the course in this subject in 1963.

In the book, the author presents a systematic discussion on the hydrokinetics erosion by particles travelling in fluid streams in all its aspects, and then develops it to the characteristic of the hydraulic turbine abrasive erosion by silt.

the book is divided into twelve chapters: introduction; mechanism of hydrokinetics particle erosion; analytical calculation of hydrokinetics particle erosion; experimental methods and equipments in the research on turbine silt erosion; fundamental theory of hydrokinetics particle erosion; characteristic of turbine silt erosion; measures in design and operation for improvement of turbine erosion resistance; treatment and repair of turbine parts.

against erosion; anti-erosion metals; anti-erosion rigid polymer coating; anti-erosion elastic rubber coating; other anti-erosion materials.

The author is looking forward to the reader's valuable comments which can be sent to him at his following address: Beijing postgraduate division, North-China institute of water conservancy and waterpower engineering, Zi Zhu Yuan, Beijing, China.

the author wishes to express his heartfelt appreciation to the many researchers listed into the reference whose arguments, illustrations and data have been quoted in this book and beg their pardon for not pointing out one after another.

Duan Chang Guo

17th July, 1981

Beijing

# 目 录

## 第一章 概 述

- § 1 水轮机沙粒磨损的概念..... 1
- § 2 水轮机沙粒磨损的危害..... 4
- § 3 我国水轮机沙粒磨损问题的概况..... 7

## 第二章 水轮机沙粒磨损的机制

- § 1 水轮机沙粒磨损的外观形态..... 9
- § 2 水轮机沙粒磨损的机制..... 10

## 第三章 沙粒磨损的解析计算

- § 1 微切削磨损过程的解析计算..... 19
- § 2 变形磨损过程的解析计算..... 31
- § 3 复合磨损过程的解析计算..... 36

## 第四章 水轮机沙粒磨损实验研究方法

- § 1 概述..... 51
- § 2 水轮机沙粒磨损实验方法的种类..... 52
- § 3 沙粒磨损实验装置..... 56
- § 4 对各种实验方法的分析..... 80
- § 5 水轮机沙粒磨损程度的定义..... 83



## 第五章 流体动力学沙粒磨损基本规律

- § 1 沙粒特性对磨损强度的影响…………… 85
- § 2 含沙水流特性对磨损强度的影响…………… 112
- § 3 磨损作用条件对磨损强度的影响…………… 137
- § 4 空蚀和沙粒磨损的相互影响…………… 164
- § 5 水轮机材料特性对磨损强度的影响…………… 175

## 第六章 水轮机部件沙粒磨损特征

- § 1 水轮机部件沙粒磨损基本形态…………… 208
- § 2 水轮机磨损条件分析…………… 215

## 第七章 水轮机抗磨设计和运行措施

- § 1 水工建筑拦沙措施…………… 233
- § 2 在含沙水流中工作的水轮机之选择…………… 240
- § 3 固液两相流动条件下转轮的水力设计…………… 249
- § 4 水轮机抗磨结构设计…………… 254
- § 5 水轮机运行工况的控制…………… 267
- § 6 水轮机磨损程度的估算…………… 271

## 第八章 水轮机抗磨金属材料

- § 1 合金金相组织特点对其抗磨性的影响…………… 280
- § 2 合金元素对合金抗磨蚀性的影响…………… 285
- § 3 热处理工艺对金属抗磨性的影响…………… 298
- § 4 表面扩散渗镀处理的抗磨蚀效果…………… 304
- § 5 金属材料抗磨性实验结果…………… 308

§ 6	水轮机抗磨金属材料的选择	329
-----	--------------	-----

## 第九章 水轮机部件抗磨蚀处理和修复

§ 1	抗磨蚀处理方法	339
§ 2	水轮机抗磨复层制备工艺	351
§ 3	水轮机磨蚀部件的修复工作	370

## 第十章 聚合物抗磨刚性复层

§ 1	热固性环氧树脂抗磨复层	376
§ 2	热塑性塑料粉末抗磨复层	409

## 第十一章 弹性橡胶抗磨复层

§ 1	沙粒冲击下弹性材料的磨损特性	418
§ 2	弹性材料的松弛机制和溃裂流速	422
§ 3	弹性橡胶材料的抗磨蚀能力	427
§ 4	抗磨合成橡胶的种类和性能	430
§ 5	水轮机弹性抗磨复层	443

## 第十二章 其它抗磨材料

§ 1	工程塑料	451
§ 2	陶瓷类材料	456
§ 3	高硬烧结合金属材料	457

## 专题参考文献

# 第一章

## 概 述

### § 1 水轮机沙粒磨损的概念

当通过水轮机流道的工作水流中含有坚硬的泥沙颗粒时，沙粒作用于水轮机过流部件表面而使其损坏的过程，称为水轮机沙粒磨损。

“磨损”本身的概念相当广泛。两物体以一定形式相接触而引起的物体材料损失均称磨损。磨损分类方法颇多。依磨损表面产生的现象，可分为：氧化磨损、热磨损、点蚀磨损与磨粒磨损〔59〕。其中，工作材料在一定介质条件下，受到外来磨料（坚硬固体颗粒。有人也将液滴包括在内）作用，使其表面产生材料损失的过程，均定义为“磨粒磨损”。

磨粒磨损可根据磨粒状态分为三类：有压固定磨粒磨损（如砂轮的研磨）、有压非固定磨粒磨损（如间隙中混入固体颗粒的轴承磨损）和自由磨粒型流体动力学磨损。流体动力学磨粒磨损又依流体介质不同而有气流磨粒磨损（如喷砂枪喷咀、燃气轮机叶片、引行器螺旋桨和火箭喷咀等装置的磨损）和水流磨粒磨损（如水轮机、泥浆泵、杂质泵和各种水力传输固体颗粒装置的磨损）。

依上述分类方法，磨损分类如表1-1所示。

水轮机沙粒磨损属于自由磨粒水动力学磨损。工作材料

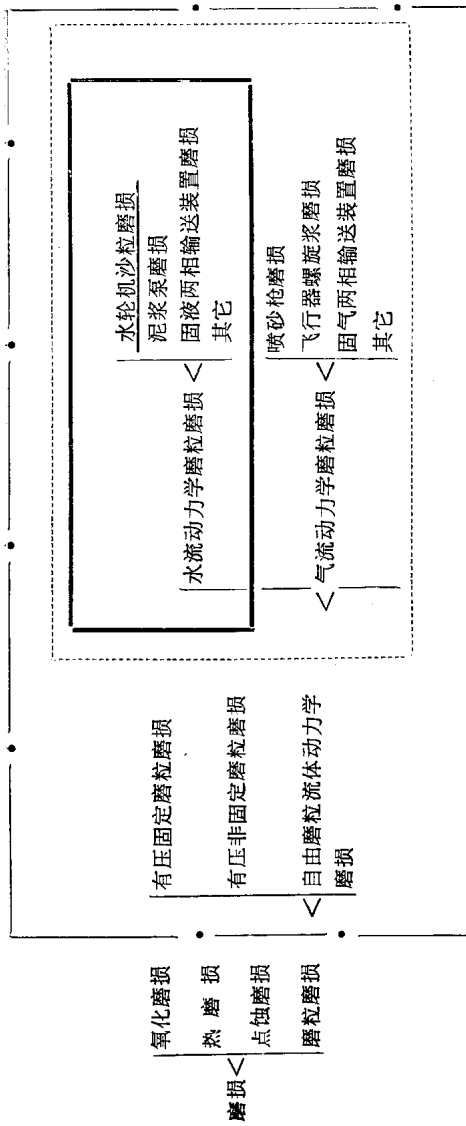
为水轮机各过流部件(反击式水轮机的蜗壳、座环、导水机构、转轮、转轮室和尾水管, 以及冲击式水轮机的针伐、喷咀和水斗等); 介质为水轮机工作水流; 磨粒为水流中挟带的固体颗粒(河沙、矿渣、岩石碎片、粘土粉末状微粒等)。

了解磨损的分类, 有助于建立水轮机沙粒磨损的正确概念。同时, 鉴于相近类型磨损的机制有相似之处, 而对水轮机沙粒磨损的专门研究和技术手段尚不完善。因此, 参考和引用其它相近类型磨损的长期积累的成果是必要的。当然, 在这种情况下, 首先需要注意各类型磨损与水轮机沙粒磨损过程的相似性范围。

分类表 1-1 中, 用实线、虚线和点划线框定范围内的磨损类型依次与水轮机沙粒磨损有更大的相似性。特别是, 对于气体动力学磨粒磨损, 其磨损过程的机制与水动力学磨损基本相同。无论是固相颗粒在流体流中的运动特性, 或是颗粒对材料表面的冲击破坏机制, 两者本质上并无差别。不同之处, 仅在于某些特征参数(如, 流体密度和运动粘性等)数值不同。文献中常将这两种磨粒磨损统称为“固体颗粒冲蚀磨损”或“砂蚀”〔270, 276〕。因此, 水轮机沙粒磨损过程的机制, 以及抗磨损材料等问题的研究中, 可以参考这些相近类型磨损的实验与研究资料。但应注意实际磨损条件和实验条件的差异。

产生水轮机沙粒磨损的必要条件是水流中存在泥沙颗粒——磨粒。严格说来, 水轮机工作水流中总有一定的含沙量。但含沙量很小时, 并不造成可以觉察的材料损失。而在下列情况下, 水轮机流道中的工作水流将挟有大量悬浮泥沙颗粒(甚至推移质沙粒), 从而可以造成水轮机过水部件严

表 1-1



重的沙粒磨损。

① 河流本身的年平均含沙量大，沙峰集中；

② 水轮机取水建筑沉沙性能不良。如水库淤积，沉沙设备沉降尺寸不足，或直接从河流中取水而无沉沙设备时。

但是，即使水轮机在含沙水流中工作，如果所提供的抗沙粒磨损措施有效时，也可能在一定工作期间内，使水轮机过流部件并不产生足以影响水轮机工作质量的材料损失。这就是研究水轮机沙粒磨损的主要目的。

## § 2 水轮机沙粒磨损的危害

水轮机过水部件因沙粒磨损而产生材料损失是水轮机沙粒磨损的直接后果。同时，由此引起一系列间接后果，使水电站技术经济效益大为降低。这包括：

① 水轮机效率下降。

混流式水轮机上下部迷宫环间隙和轴流式及斜流式水轮机叶片与转轮室之间的间隙，在沙粒磨损作用下，逐渐增大，而导致水轮机容积效率下降。容积效率的下降在整个因沙粒磨损而下降的效率中占较大比重，常可达到 $1/2$ 左右〔64〕。

水轮机过流部件表面，遭到沙粒磨损时，若沙粒微细，造成均匀的轻微磨损时，有可能改善原来表面的糙度和不良的流道外形，使水轮机水力效率反而稍有提高〔24,157,190〕。随磨损的发展，过流表面将凹凸不平，进而使过流部件失去原设计表面形状。导叶出口部分的磨损使转轮水流进口角变化，增大进口损失。转轮出口边磨损使出口环量增加。这均使得水轮机水力效率降低。

由于迷宫环被磨损后漏水量增加，如果减压孔尺寸不够时，推力轴承负荷将增大，并可能使含沙水流进入导轴承。这都将使水轮机机械效率下降。

对于冲击式水轮机，引水管道、针阀、喷咀和水轮机转轮工作面遭到泥沙磨损后，沿程水力摩擦损失增加。特别是，喷咀另件的少许磨损就会使水轮机效率下降很多。这主要是因为增加了射流的分散和脉动。Murthy [243] 的资料表明，针阀只要被磨损0.5~1.0毫米，水轮机效率下降就可达到9%。斗叶工作面和分水刃被磨损后，转轮水力损失也会大为增加。

综上所述，水轮机遭受沙粒磨损后，效率将下降。例如，田庄水电站经过一段运行时间后，水轮机效率下降，仅能达到48%，降低到设计效率的一半左右。其主要原因系沙粒磨损所致 [9]。

水轮机效率的下降将造成发电量的损失。如苏联巴克桑电站，在一年内，由于沙粒磨损引起效率降低而损失的发电量达150万度，折合5个新的水轮机转轮 [160]。此外，由于效率下降，水轮机将不能维持设计出力。如七里营水电站运转13120小时后，出力只能达到设计出力的77%。电站出力的下降，不只造成电量的损失，还将影响电力系统的供电保证。

## ② 水电站检修周期缩短，检修时间增长。

在含有大量悬浮泥沙的水流中工作的水轮机，其沙粒磨损破坏程度常常是决定检修周期和检修工作量的最主要的因素。沙粒磨损严重的水电站，正常的运行和检修周期无法保证（一般规范规定，大修期应不低于4年 [139]）。我国规定不低

于3年)。检修周期大大缩短。如意大利维纳乌斯电站，1.6万千瓦冲击式水轮机，运行一段时间以后，需要每隔约20天就堆焊一次受沙粒磨损的部位，年耗堆焊金属达50吨。

此外，河流的洪峰和沙峰几乎都在汛期出现。因而，河流各梯级电站的水轮机在汛期都承受严重的沙粒磨损，汛期后都需要及时检修。为此，人力和设备等都需要大为增加，以满足集中检修的需要。而且，大批机组停机将使电力系统供电紧张，用户生产受限。如三门峡电站，因水轮机遭到严重沙粒磨损，频繁停机检修，难于保持机组全部投入运转。

### ③ 降低水电站运行质量。

水轮机过流部件表面被泥沙磨损后而凹凸不平，促进了水流的局部扰动和空化的发展；转轮的不对称磨损，特别是个别叶片的出口边因磨损严重而折断时，将造成水力的和机械的不平衡。这些因素都会使机组运行振动加剧。有过因此而造成继发事故的例子〔52〕。

此外，导水机构和喷咀另件的磨损，常造成漏水量过大而无法正常工作停机的情况；并增加调相时的功率损失和转轮室排水的困难。混流式水轮机下迷宫环和轴流式水轮机转轮叶片端部及转轮室护面磨损严重时，漏水量增大。未经充分消能的水流可能将尾水管护面冲掉，冲刷机组基础混凝土，影响机组安全。

综上所述，水轮机沙粒磨损对水电站的正常运转有十分不利的影晌。因而是一个相当重要的水轮机特殊运行问题。



## § 3 我国水轮机沙粒磨损

### 问题的概况

我国华北和西北地区，大多数河流的流域包括了广阔的黄土高原和丘陵地区。黄土缺乏密实结构，颗粒很细。同时，这些地区汛期暴雨频繁。因此，大量泥沙被地表径流带走，使这些地区的河流中挟有大量泥沙。而且，泥沙中坚硬颗粒较多。如黄河泥沙中的坚硬矿物成份占80~90%，含沙量极大，世界罕见。世界著名多沙河流泥沙特性的比较见表 1-2。

表 1-2

河 流 名 称	多年平均含沙量 (kg/m <sup>3</sup> )
尼罗河 (埃及)	1
阿姆河 (苏联)	4
科罗拉多河 (美国)	10
黄河 (陕县水文站)	32.3

我国西南地区河流，河道落差极高，含沙量虽然不大，但泥沙颗粒形状尖锐，粒径较大，硬度较高。在高水头作用下，也会存在沙粒磨损问题。

近年来，我国一系列电站产生了严重的沙粒磨损。典型的如七里营电站，何营电站，喀什电站，六郎洞电站，盐锅峡电站、青铜峡电站，三门峡电站等。这些电站都因沙粒磨损而影响了电站的正常运行。其中，七里营和何营电站已因严重沙粒磨损而不能正常运转。

任何水库都不能避免淤积问题。随水库淤积，沉沙效果下降，进入水轮机的泥沙颗粒增多，粒径增大，从而使水轮机沙粒磨损问题将日趋严重。我国水库运行年限较短，但淤积问题目前已较严重。根据河流泥沙条件看来，一些水库的