



国家自然科学基金研究项目专著

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

高压闸门水封的 非线性计算 理论与应用

刘礼华 欧珠光 陈五一 方寒梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高压闸门水封的 非线性计算理论与应用

◎ 刘礼华 欧珠光 陈五一 方寒梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

根据当前大流量高水头电站建设和发展的需要,作者在国家自然科学基金资助下进行了专题研究,全面总结了高压闸门水封计算理论及应用的研究成果,在此基础上撰写了这部理论与实践紧密结合的专著。

本书阐述了高压闸门水封非线性有限元计算的基本理论和工程应用实例。全书包括:橡胶类止水材料的力学性能实验研究,橡胶类止水材料性质与参数的研究,橡胶类止水材料的黏弹性研究,橡胶类止水材料的耐久性研究,橡胶类止水材料非线性的问题与计算,结合瀑布沟、水口、拉西瓦等巨型水电站闸门水封进行了非线性有限元理论及计算方法分析研究,并对水封水密性规律及封水判据进行了总结。

本书是水利水电工程界从事设计、施工、科研、管理的广大工程技术人员及高等院校相关专业师生的宝贵参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高压闸门水封的非线性计算理论与应用 / 刘礼华等
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2010.7
ISBN 978-7-5084-7689-6

I. ①高… II. ①刘… III. ①高压闸门—止水材料—非线性—计算方法 IV. ①TV663②TV442

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第131200号

书 名	高压闸门水封的非线性计算理论与应用
作 者	刘礼华 欧珠光 陈五一 方寒梅 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京鑫丰华彩印有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

随着我国水利水电事业的发展,高坝、大流量水电站(如锦屏一级、小湾以及两河口水电站,坝高达300m级)不断开发,特别是国家能源战略要求优先发展可再生能源的背景下,西北、西南地区将出现许多高水头、甚至是前所未有的特高水头电站,泄水孔、洞闸门的止水问题显得越来越突出。高水头作用下闸门发生漏水,不仅会引起不必要的水资源损失,而且可能形成缝隙流,导致建筑物空蚀和闸门振动,威胁工程安全。高压闸门止水装置的可靠性与合理性日益受到工程界的关注。虽然止水装置是水工闸门的细部结构,但止水型式和水封结构往往决定了高压闸门运行的安全性和耐久性,因而止水装置的设计计算已成为高压闸门设计的关键性技术问题。

我国对高压闸门止水的设计十分重视,随着20世纪80年代以来大孔口、高压闸门的不断出现,国内有陕西机械学院、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、武汉大学(原武汉水利电力大学)、昆明水利水电研究院水科所等单位先后从事这方面的研究。就现状来看高压闸门止水基本上可以分为偏心铰压紧式和液压伸缩式两种型式,前者通过偏心铰转动使闸门面板向前移动压紧水封封头而封水,当闸门总水压力很大时,偏心铰的制造在技术上很困难;后者闸门采用普通圆柱铰进行支撑,在水封止水元件背部施加一定的背压使止水元件封头向外伸移,封头压紧门槽垫板(或闸门面板)而封水。偏心铰压紧式止水已应用于东江、龙羊峡、小浪底、水布垭等工程,液压伸缩式止水已应用在漫湾、宝珠寺、天生桥一级、二滩、东风、洪家渡、瀑布沟等水电站,并还有一批设计建设中的高水头水电站(如锦屏一级电站)拟采用偏心铰压紧式和液压伸缩式止水型式,这些闸门的最大设计水头是水布垭放空洞弧门的150m(液压伸缩式止水型式闸门的最大设计水头是瀑布沟的140m)。随着止水型式的不断发展,水封结构也在不断向着高强、耐久的方向发展。水封止水元件的材质分为橡胶、橡塑、塑料、铜板及合金等五大类,其中采用得最普遍的是橡胶类水封和近20年发展起来的橡塑类水封,这些水封止水元件材料可以看成是体积不可压缩的超弹性材料。

《高压闸门水封的非线性计算理论与应用》一书内容丰富、层次分明,首先详尽阐述了高水头闸门水封的种类、特点、结构组成、当前运用情况,使读者对高压闸门水封有一个全面系统的了解;然后用较大篇幅介绍了高压闸

门水封止水元件的材料力学特性、水封接触问题、止水材料的黏弹性性质、止水材料的力学计算模型；此外，结合瀑布沟水电站放空洞弧门伸缩式水封、水口水电站底孔浮体闸门大截面承载传力水封、拉西瓦水电站导流封堵闸门自封闭式水封等实际工程问题的仿真计算和模型实验作了专题介绍；对高压闸门水封的非线性计算进行了有益探索并取得了一些有用成果，基本上解决了高压闸门水封的加载、接触和材料流变等问题，初步提出了对高压闸门水封设计计算与评估的一般方法。

作者从非线性计算理论原理、计算的力学模型、模型实验方法和工程应用实例等方面，较系统地撰写了全书内容。书中吸收了当前高压闸门水封计算与实验的先进理论和技术，具有多学科（如，橡胶设计理论、模型实验、有限元计算与分析等）交叉融合的特点，是一本学术性与实用性相结合的专著。作者把闸门水封的计算理论与多年工程经验结合起来，在水封元件非线性力学计算模型、水封实验平台、水封实验方法、水封封水判据等方面提出了许多自己的创新观点与建议。在内容编排上，本书还有系统性强、理论联系实际、叙述深入浅出、内容精练、结构紧凑等特点。

由于高压闸门水封的工作状况涉及到材料非线性、几何非线性和接触边界非线性，它的应力—应变状态非常复杂、不易描述清楚，国内外针对闸门止水进行仿真计算研究的内容还比较少，闸门水封设计计算缺乏一套可靠、实用的理论和计算方法，可以认为目前对高压闸门水封设计计算理论进行基础性、规律性研究的成果还是空白。本书的出版将填补我国在这方面的空白，也必将促进高水头闸门在水利水电工程中的科学应用。

中国工程院院士

张超然

2009年8月

前 言

高压闸门是大流量高水头电站的最重要组成部分之一，其止水装置（水封）的结构型式、材质及性能的优劣是影响闸门止水效果和使用寿命的关键。现今高压闸门大量采用的充压伸缩式水封，在我国的高水头电站有一定的使用、设计、制作经验，但仍存在着缺乏完善的计算分析理论和缺乏长期应用经验积累等问题，以致工程中常会出现水封结构设计不合理，材质选用不当造成低压封不住、高压稳不住的状况，并且存在封头安装不到位、翼头滑动、封头偏移过大及止水元件伸缩受阻等故障，从而影响水封的封水效果和使用寿命。

水封的设计不能光靠设计经验与模型实验方法来实现，应该重视水封设计中的理论计算分析方法，而理论计算分析方法又涉及到水封的材料非线性、几何非线性、接触非线性等力学分析内容。此外，常规的数值计算方法难以定量地分析出水封止水元件橡皮的应力和变形。为此，本书将以非线性有限元理论为基础，结合瀑布沟水电站放空洞弧门的水封设计，对高压闸门充压伸缩式水封封水的一般技术及自封闭技术进行了深入研究，提出了新的简单可行的水封非线性有限元计算理论的分析与方法，并用水封原型断面模型进行了实验验证，取得了有价值的研究成果，为实际工程的闸门水封设计与校核计算提供了指导性和实用性的参考。同时，我们将高压闸门充压伸缩式水封的自封闭技术的研究成果首次在黄河拉西瓦水电站导流隧洞封堵闸门上进行了实践应用并已取得成功，使得该项技术在本领域内处于世界领先水平。

水封装置的核心部件是止水元件。为达到高压闸门封水的目的，工程实践中要求止水元件首先必须具有高弹性。过去止水元件经常采用橡胶制品，随着闸门封水水头的提高，现在又出现一些改性橡胶、工程塑料和其他一些高分子复合材料，这些材料都具有短期加载超弹性和长期加载流变性的特点，它们只是承载强度比橡胶高，但材料的本构关系与橡胶相似，由此本书把此类止水材料都归属为橡胶类材料。

本书主要围绕水封的非线性有限元计算理论及其应用做了如下研究工作。

(1) 止水材料的基础特性研究。橡胶类止水材料是体积不可压缩的超弹性材料，将橡胶材料的本构关系引用到止水问题中，给出止水材料接触问题的求解公式，并提出了接触面的加载方法。

(2) 止水材料的黏弹性研究。首先，发展改进了 Mooney - Rivlin 公式，通过大量分析、研究后，最后把材料物理参数假设为随时间变化的黏弹性函

数,并通过实例导出了求取黏弹性函数的方法;其次,从材料的基本特征入手推导出止水材料的三参量流变公式和各流变参量的计算公式。

(3) 止水材料的耐久性研究。从止水材料的黏弹性性质出发,研究了在不同流体与温度等环境下,其蠕变及应力松弛对止水耐久性的影响,以及止水元件的耐久性评估的方法等。

(4) 黏弹性实验研究。对止水材料的力学性能,特别是其黏弹性的力学性能做了实验研究。

(5) 水封止水元件非线性有限元计算理论、方法及设计应用的研究。结合瀑布沟水电站放空洞弧门的水封设计,应用水封非线性有限元计算理论及计算方法进行分析研究,同时采用其原型断面进行水封模型实验,验证其计算理论的正确性,解决了闸门水封橡胶类止水元件的非线性有限元计算问题,并且将其应用于水封的设计计算。水封非线性计算理论除了已用于瀑布沟水电站放空洞弧门水封设计外,还用于:①某大型水电站底孔弧门常规式P形等水封;②水口水电站底孔浮体闸门大截面承载传力水封;③拉西瓦水电站导流隧洞封堵闸门自封闭式水封等的设计与校核计算,均取得了正确的结果。

(6) 水封水密性规律及封水判据的研究。将水封理论计算结果与实验分析相结合,寻找水封水密性规律,进而推断水封的封水判据,为水封非线性有限元计算理论的推广和应用提供了科学的方法、依据和广阔前景。

水电工程科学技术的理论与实践研究是一项群策群力的艰苦工作,本书的研究成果得益于国家自然科学基金的资助,并得到了中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院和中国水电顾问集团西北勘测设计研究院等有关单位专家、同仁的大力支持与帮助,我们在高压闸门水封研究方面所取得的每一点进步,都包含了他们此前所付出的辛勤劳动和智慧。本书在撰写过程中,承蒙中国工程院张超然院士和长江水利委员会长江勘测规划设计研究院魏文炜教授级高工对本书审阅并推荐;还得到武汉大学土木建筑工程学院曾又林教授、张宏志高工、陈黎明工程师的大力支持与帮助;研究生朱灿灿、陈亚鹏、吕念东、李翠华、熊威、夏梦、李文、魏晓斌、王蒂等在水封的非线性有限元计算研究、模型实验分析、数据整理以及资料收集等方面做了很多工作,特别是王蒂同学做了大量的打字、制图及核对工作,在此一并表示诚挚的感谢。

尽管作者在高压水封的非线性有限元计算理论与应用领域里进行了近10年的研究,但鉴于本书编撰过程的局限和作者的水平所限,不可避免地会出现一些不当之处与错误,恳请广大读者批评指正。

作者

2010年3月于武汉大学

目 录

序 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高压闸门水封研究的目的和意义	1
1.2 高压闸门水封的作用、要求及分类	2
1.3 高压闸门水封研究现状	3
1.4 高压闸门水封的研究方法与思路	8
1.5 高压闸门水封目前的研究工作	9
第 2 章 橡胶类止水材料的力学性能实验研究	11
2.1 止水材料的硬度实验	11
2.2 止水材料的拉伸与压缩实验	13
2.3 止水材料的摩擦实验	16
2.4 止水材料的黏弹性实验	23
第 3 章 橡胶类止水材料性质与参数的研究	27
3.1 止水材料的性质	27
3.2 橡胶超弹性本构关系	28
3.3 止水材料参数	30
3.4 止水材料的两参数 Rivlin 公式	34
3.5 止水材料 Rivlin 公式的其他形式	37
3.6 止水材料 Rivlin 公式的应用实例	41
3.7 止水材料的 Ogden 公式	46
第 4 章 橡胶类止水材料的黏弹性研究	52
4.1 Mooney - Rivlin 修正公式的研究	52
4.2 几种常用止水材料 Mooney - Rivlin 黏弹性函数的实验研究	54
4.3 橡胶类材料与固体流变模型三维本构关系的研究	56
4.4 三种常用止水材料流变参量的研究	60
第 5 章 橡胶类止水材料的耐久性研究	64
5.1 止水材料的耐久性特征	64
5.2 止水材料黏弹性对其耐久性的影响	65
5.3 环境温度对止水材料耐久性的影响	67
5.4 流体环境对止水材料耐久性的影响	68

5.5	止水材料与金属结合的耐久性·····	69
5.6	橡胶类止水元件的耐久性评估方法及目的·····	70
第6章	橡胶类止水材料非线性的问题与计算 ·····	71
6.1	止水材料大变形的时空描述·····	71
6.2	止水材料的材料非线性问题·····	73
6.3	止水材料的几何非线性问题·····	74
6.4	止水材料的接触非线性问题·····	77
6.5	止水材料的非线性有限元计算·····	84
6.6	用非协调元解决材料体积不可压缩性问题·····	87
6.7	非线性方程组的解法和收敛准则·····	88
6.8	ANSYS 软件非线性分析功能及其在水封计算中的应用·····	90
第7章	瀑布沟水电站放空洞弧门充压伸缩式水封非线性有限元计算 ·····	94
7.1	工程概况·····	94
7.2	水封的结构及材质·····	95
7.3	水封止水元件的非线性有限元计算力学模型·····	95
7.4	水封非线性有限元计算程序及方法步骤·····	99
7.5	翼头的优化比较·····	99
7.6	封头的优化计算比较·····	104
7.7	水封断面优化计算结果·····	109
7.8	充压伸缩式水封止水元件时程分析·····	110
7.9	充压伸缩式水封特征数据计算·····	113
7.10	充压伸缩式水封水密性计算·····	115
7.11	充压伸缩式水封优化设计的新思路·····	118
第8章	瀑布沟水电站放空洞弧门充压伸缩式水封模型实验 ·····	121
8.1	高压闸门水封实验装置·····	121
8.2	实验水封模型设计·····	122
8.3	封头自由外伸量测试·····	123
8.4	封头接触宽度的测试与其接触应力的计算·····	125
8.5	封头压缩量测试·····	130
8.6	水封水密性实验与封头偏移量·····	131
8.7	计算结果与实验结果比较·····	134
8.8	实验小结·····	135
第9章	某巨型水电站底孔弧门常规水封仿真计算 ·····	136
9.1	概述·····	136
9.2	弧门常规水封仿真计算·····	137
9.3	弧门常规水封仿真计算结果·····	140
9.4	结论与展望·····	173

第 10 章	水口水电站底孔浮体闸门大截面承载传力水封仿真计算	175
10.1	工程特点与水封计算目的	175
10.2	浮体闸门承载传力水封的基本结构	175
10.3	承载传力水封的仿真计算	177
10.4	承载传力水封仿真计算结果	178
10.5	承载传力水封仿真计算结果分析	184
10.6	结论与建议	192
第 11 章	拉西瓦水电站导流封堵闸门自封闭式水封的非线性有限元计算	193
11.1	概述	193
11.2	自封闭式水封的工作原理	196
11.3	自封闭式水封的非线性有限元计算	197
11.4	闸门水封摩阻力的非线性有限元计算	206
11.5	结论与建议	209
第 12 章	拉西瓦水电站导流封堵闸门自封闭式水封模型实验研究	210
12.1	概述	210
12.2	自封闭式水封模型实验研究	215
12.3	自封闭式水封单质止水元件模型实验	219
12.4	模型实验研究结论与建议	221
第 13 章	水封的水密性规律及封水判据	223
13.1	理论计算与实验分析总结	223
13.2	水封水密性的规律	224
13.3	充压伸缩式水封的封水判据	229
13.4	水封研究的展望	231
参考文献		232

第1章 绪 论

1.1 高压闸门水封研究的目的和意义

国内自 20 世纪 80 年代开始研究高压闸门水封,近十几年来,新材料、新技术日新月异,采用将水封技术不断推向新的高度,特别是三峡工程的建设,使我国水电建设技术在多方面走在了世界前列。随着国家西部大开发政策的实施,在国家能源战略要求优先发展可再生能源的背景下,西北、西南地区将出现许多高水头,甚至是特高水头的电站,这对水工技术特别是闸门封水技术提出了更高更新的要求。

在闸门设计中,门体、门槽的设计技术已比较成熟,闸门的止水问题由从属的技术问题演变为闸门设计的关键技术问题。尽管闸门水封在水利枢纽布置上所占空间位置的比例很小,但却是一个至关重要的问题。如果闸门封水效果不好,首先,会出现漏水,造成水资源浪费;其次也会形成缝隙流,容易带来闸门的振动和空化空蚀现象,从而威胁钢闸门乃至整个水工建筑物的安全;第三,闸门水封的拆卸安装周期长、难度大,频繁地更换水封,要花费大量的人工和材料费。所以在闸门水封设计中,特别是对高压闸门水封进行进一步深入研究是有重大意义的,也是迫切需要解决的。

由于这个课题涉及到计算力学、材料学和工程设计学等诸多学科,如何引入新的研发方法与研究手段,以及结合不同层面、不同视角的科研与技术队伍通过合作的形式,寻找高压闸门水封技术新的突破,使止水部分的局部与细节的技术设计更加精细化,是今后高压闸门水封研究的重要方向。

最近几年来对常规水封的适用水头一般在 70m 左右的观点已有所突破,在对水封结构的设计作适当的调整后,用于深孔弧门的 P 形水封的止水水头可以有相当幅度的提高。充压伸缩式水封是近 10 年发展起来的一种高压闸门水封,这种水封是通过给止水元件施加背压,使止水元件封头伸出挤压止水面板,封住水流。这种水封最理想的状态是利用库水压力作水封的背压来保持水封的有效止水,可以减少人为充压设备的启动次数甚至取消人为充压设备,但国内充压伸缩式水封的应用水头大多只在 100m 级范围内(如成都勘测设计研究院设计的二滩中孔弧门的水头为 80m)。100m 以上高水头的伸缩式水封还存在一些问题,目前正在研发,并已有部分成果用于实际工程。

尽管近 10 年来国内对弧形工作闸门采用的充压伸缩式水封已有不少研究,实际工程也有所运用,但对于挡水水头 100m 以上的闸门水封,仍存在许多技术问题及其耐久性问题,譬如水封安装的变形控制、水封结构的断面型式、水封材质、背压与水封水密性关系等一些关键问题尚无定论;而由于橡胶类止水材料的蠕变性及应力松弛性的黏弹性质,处于长期高压下工作的水封的耐久性所受到的极大影响并未弄清楚;又由于水封的结构、断



面型式、材料的本构关系与工作边界复杂,目前还缺乏成熟有效的分析计算手段,急需进一步深入研究来寻找解决问题的方法。本书针对上述问题进行理论分析和实验研究,通过理论计算和实验研究,寻求一种 150m 级利用水库库水头保压的充压伸缩的自封闭式水封的最优断面型式,为今后高压闸门水封的设计提供依据。为建立高压闸门水封设计计算理论及方法奠定基础,提高高水头闸门运行的安全性和耐久性,使我国高水头闸门的设计建设达到世界先进水平。

1.2 高压闸门水封的作用、要求及分类

1.2.1 高压闸门水封的作用

水封是闸门最重要的部件之一。水封的作用就是封水,即在闸门关闭后堵塞门体与门孔周边的空隙,以阻止闸孔漏水。封水不严会使水库有渗漏损失,造成水资源的浪费,从而减少枯水期电站的发电量、水库的灌溉量。如果施工期用的闸门封水效果不好,则会影响施工进度及质量。检修闸门漏水会造成检修区排水困难,影响工程检修。在低温情况下漏水,会使闸门结冰,导致启闭操作困难,影响工程的安全运行。对于高水头闸门,水封装置更为重要,因为水封止水元件与门体止水面之间若存在缝隙,或水封结构有缺陷,关闭后或运行时均可能使闸门产生剧烈振动;启闭过程中门顶漏水也会影响启闭机操作人员的工作和安全;并会使闸门与埋件产生空蚀和磨损乃至破坏,从而威胁整个水工建筑物的安全。此外,水头越高,漏水量越大。可见,高压闸门水封对闸门乃至整个水工建筑物具有重要的经济与安全作用。

1.2.2 高压闸门水封装置的要求

根据水封的作用,高水头闸门的水封装置应该满足以下要求:① 水封的水密性能好;② 闸门在开启、关闭过程中能有效地防止或消除闸门振动;③ 闸门启闭过程,水封的止水元件应有良好的耐磨性能;④ 闸门启闭时,水封的摩阻力尽可能小,且水封不得产生不利于闸门运行的阻力;⑤ 水封结构要尽量简单,操作维修方便;⑥ 水封材质既要有一定的必要的弹性,又要有足够的刚度、强度和耐久性。

要满足上述水封装置的要求,除了在止水元件的材质方面讲究之外,还与水封的结构断面型式有关,要从水封结构型式上加以研究。目前有两种水封结构型式可以考虑:一是采用变形止水,由闸门移动,使止水元件受压,如压紧式水封;一是采用自控式止水,强制止水元件本身作一定位移,如充压伸缩式水封。此外,闸门底止水由于受到高速水流的冲击,使用寿命会短,因此对底止水的结构型式的研究显得更为重要。

1.2.3 闸门水封分类与高压闸门水封型式

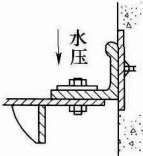
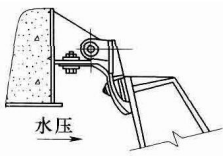
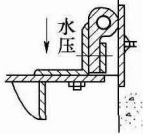
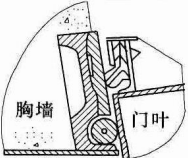
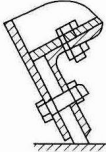
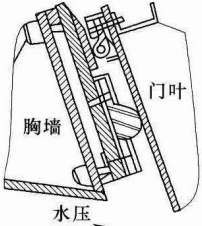
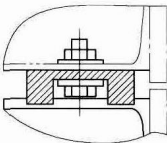
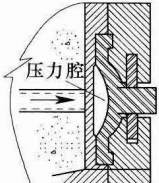
1.2.3.1 闸门水封装置分类

水封按其装设位置可分为顶止水、侧止水、底止水和节间止水四种;按止水元件断面型式分,有:P形、条形、凹形、L形、圆滚浮子式、 Ω 形、“山”字形充压伸缩式等常规的水封,见表 1.1。



表 1.1

常规止水元件断面型式

序号	断面型式	名称	常用功能	序号	断面型式	名称	常用功能
1		L 形	弧形闸门侧止水	5		活动铰	弧形闸门顶止水
2		P 形	顶止水、侧止水	6		圆滚浮子式	弧形闸门顶止水
3		条形	平面闸门, 弧形闸门底止水	7		Ω 形	弧形闸门顶止水
4		凹形	平面闸门节间止水	8		“山”字形充压伸缩式	弧形闸门止水

1.2.3.2 高水头闸门常用的水封型式

高水头闸门的水封对弧形闸门, 目前多采用突扩门槽弧门偏心铰压紧式水封和充压伸缩式(或充压膨胀式)水封等新型水封型式。按有无突扩门槽又可分为无突扩门槽预压式和突扩门槽式的闸门水封结构。

1.3 高压闸门水封研究现状

高压闸门水封的研究应包括两方面的内容: 一方面是水封材质的研究; 另一方面是水封结构型式的研究。下面从这两个方面入手, 分别介绍国内外高压闸门水封的研究现状。

1.3.1 高压闸门水封材质使用的发展现状

随着水封结构型式不断发展, 水封材料也不断向着高强度、耐久性方向发展。水封的材质大致可分为非橡胶质、橡胶、橡塑、塑料、铜板及合金(不锈钢)等六大类。在高压闸门水封中, 其止水元件一般采用纯天然橡胶或近 20 年发展起来的橡塑复合材料。在水封材质的研发方法上, 由单纯的材料模型实验到材料的模型实验与材料模型的非线性理论计算相结合的研究。对于高压闸门水封材质的研究大概可分为两代研究。

第一代止水橡胶为常规纯橡皮, 将橡皮预压 2~4mm, 利用橡皮的大变形使闸门封水。在闸门运行中, 这样形成的止水型式, 使橡皮总处于较为剧烈的磨损与拉裂状态, 制



约着橡皮的运行寿命,同时,橡胶的流变性、高摩擦系数等会增大闸门启闭力,致使水封摩阻力成为启闭力的主要构成部分。

第二代止水橡胶是通过在第一代止水橡皮的密封面上贴合 1.0~1.2mm 厚的聚四氟乙烯布或喷涂 0.4~0.6mm 厚的聚四氟乙烯涂层所组成的所谓橡塑复合水封。聚四氟乙烯又名“塑料王”,是迄今发现的自润滑性最好的固体材料,摩擦系数仅为 0.02~0.09mm,该材料的性能几乎不受湿气、霉、菌、紫外线等的影响;且该材料还具有固体材料中最小的表面张力,表面不易黏附其他物质。橡塑复合水封的采用,大大减少了止水橡皮与摩擦对偶件之间的切向摩擦力,闸门启闭力大为减小,水封耐磨寿命有极大改善。

1.3.2 高压闸门水封结构型式研究的发展情况

无论闸门处于关门挡水或启闭运行状态,预压式水封都恒保持压缩状态,对库水的封堵也靠预压量产生的接触应力和接触宽度来保证,所以,这种止水机理注定只能用于低水头闸门,一般为 70m 以下水头的闸门,工程也称这种型式的水封为常规无门槽预压式水封。

国内研究高压闸门水封,始自 20 世纪 80 年代黄河上游的龙羊峡水电站,该电站泄水底孔尺寸 5m×7m,水头高 120m,底孔工作弧门设计采用偏心铰紧压式水封结构,事故检修门采用充压伸缩式水封,该两种止水型式尽管在国外已有成功应用先例,但在国内是首次采用。为掌握止水元件科学合理的设计参数与指标,原陕西机械学院水利水电研究所在国内首先开展高压闸门水封技术的研究,该所通过对 E 形、“山”字形、T 形等一系列体形形状的橡胶试件的受力变形研究,确定了“山”字形形状在受力稳定性、装夹配合性方面是更适合高压闸门水封的基本断面形状,并通过“山”字形断面的体型变化、尺寸的细部设计与筛选,最终确定了十几种止水断面型式,对封头涂层主要做了两种不同配方的橡胶(70 号、100 号)在包四氟与包铜情况下的对比实验,认为包四氟无论在与橡胶的黏结强度方面还是抗磨减摩方面都优于包铜。该所还对三种不同配方的橡胶(50 号、70 号、100 号)对钢的摩擦系数以及磨损率进行了测试,但限于设备条件的限制,轨道滑行速度仅为 8cm/min,而闸门的启闭速度一般为 100~300cm/min。为揭示闸门实际的运行情况,1987 年受西北勘测设计院的委托,原武汉水利电力大学水工摩擦、磨损实验室又对同组试件的压缩变形与摩擦、磨损特性作了进一步的实验研究,测试了不同材质止水橡胶在不同压力下的压缩量与接触宽度,不同材质在空气中、清水中、不同含沙量浑水中的摩擦系数与磨损率,以及止水橡胶摩擦系数随不同正压力、不同滑行速度、不同承压时间的变化规律。第一轮高压闸门水封的研究在水封材质的级配、止水元件截面型式、橡胶涂层材料、封水效果等方面进行了许多开拓性研究,奠定了国内高压水封研究的基础。

随着水电事业的大力发展,昆明水利水电研究院水科所、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院也相继结合国内的高压闸门水封进行研究,研究方法主要是通过多种材质、多种断面型式的水封结构的水密性实验,验证不同水封的止水效果,并成功解决了诸如小浪底、鲁瓦提、二滩、三峡、水布垭等一系列高水头电站泄洪闸门的水封问题。

不同的止水型式,工作原理不同,要求止水元件的橡胶断面结构型式不同,对橡胶力学性质的要求也不同。

1.3.2.1 偏心铰紧压式水封

偏心铰紧压式水封是借助于偏心铰的行程来推动门体径向移动,使闸门在关闭时,门



体能压紧门槽上的止水橡胶,达到密封止水效果,在闸门启闭时,门体又能无阻碍地离开门槽上的止水橡胶,既减少摩阻力,也使橡胶不致磨损,从而延长使用寿命。

偏心铰紧压式水封主要优点有以下几点。

(1) 水封依靠偏心铰机构施加机械力,能适应各种工况下不同间隙的变化,水封简单可靠,在局部开启时对闸门还有抑制振动的作用。

(2) 能有效地利用突扩门槽掺气,改善闸孔高速水流的流态。

(3) 启门运行时,由于橡胶与弧门面板脱离,从而延长橡胶的使用寿命。

(4) 在多泥沙的水流中,考虑到泥沙的因素,此类水封所受的影响较小。

主要的不足有以下几点。

(1) 由于增加了一套偏心铰和一台操作偏心铰的回转油压机,造价较高,制造、安装较为复杂。

(2) 水封在径向移动过程中,主提升油压机绕着自身支承中心转动,迫使闸门随其上移,导致门体止水面与止水元件发生相对错动,对止水元件产生向上的切搓力,但由于主止水元件的压缩量较大,切搓力相对也较大,不仅增大了副机的启闭负荷容量,而且也会影响水封的使用寿命。

1959年建成的日本二濑水电站和20世纪70年代前苏联建成的努列克水电站等一系列高水头闸门,都采用了偏心铰压紧式水封,止水效果良好。国内在20世纪80年代首次研制了几例类似的闸门,如龙羊峡工程和东江工程的闸门等,它们止水效果尚好。具体的工程实例详见表1.2。

表 1.2 国内外用偏心铰压紧式水封的工程实例

工程名称	国 家	孔口尺寸(宽×高) (m×m)	孔口面积 (m ²)	设计运行水头 (m)	总水压力 P (kN)
卢卡蓬特	美国	2.06×3.66	7.54	61	4460
诺维尔	美国	2.54×3.56	9.04	24.38	2040
二濑	日本	5.00×3.42	16.20	69	10920
大野	日本	4.00×5.32	21.28	35.25	6940
汤田	日本	5.18×3.53	18.26	54.96	9720
苑原	日本	5.00×3.56	17.80	33.78	5700
鹤田	日本	4.30×4.15	17.85	44.08	7500
松原	日本	4.40×4.40	17.64	51.50	8700
内川	日本	3.50×2.30	5.75	55.18	3110
科洛君利	保加利亚		30	64.50	19350
大渡	日本	5.0×5.6	28	60	16800
阿斯旺	埃及	4.2×3.15	13.23	80	10380
德活歇克	美国	2.75×3.80	10.45	76.2	7770
努列克	前苏联	5×6	30	110	33000
罗贡	前苏联	5×6.7	33.5	200/85	67000
塔贝拉	巴基斯坦	4.9×7.3	35.77	136	48650
龙羊峡	中国	5×7	35.00	120	42000
东江二级	中国	6.4×7.1	45.44	120	54530



1.3.2.2 “山”字形充压伸缩式水封

充压伸缩式水封结构，一般布置在突扩门槽处，其结构主要包括橡胶止水元件、压板、充压腔及金属底座（图 1.1）。从目前国内外工程应用资料看，止水元件断面型式虽然

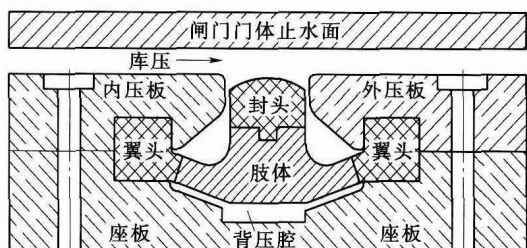


图 1.1 伸缩式水封的基本结构

各有不同，但一般以“山”字形断面为主，它由封头、翼头、肢体和肢臂等部分组成；对于充压腔，有的工程设计辅有充压袋。

对于 100m 以上水头，偏心铰紧压式止水方案由于闸门制作、安装和操作工艺复杂、工程量大、造价高等原因而很少被采用。

充压系统装置（图 1.2）由控制系统、供水保压系统、排水管路和安装在门槽埋件上的装配水封等组成。控制系统和供水保压系统主要设备安装在启闭机室。

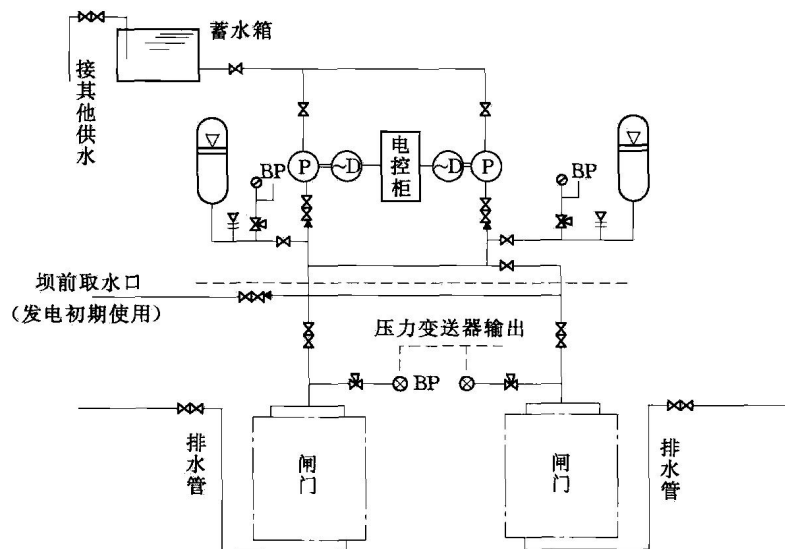


图 1.2 充压系统原理图

充压伸缩式水封的工作原理是：首先在水封安装时，保证压紧止水元件翼头，防止背压腔的水经翼头下压面从外压板与座板间的缝隙流出，然后通过控制水封上部和背部压力腔的水压变化，从而控制止水元件封头的不同伸缩变形量来实现止水，闸门关闭时，止水元件的封头向外伸出，封头挤压闸门门体止水面板而形成接触宽度与接触应力，封堵住门体止水面板与门槽间的间隙，保证水封的水密性；在闸门启闭时，止水元件的封头向内回缩，保持了封头与闸门门体止水面板间的原有空隙，既减少了闸门启闭力，又减少了封头橡胶磨损。

通过和国内众多的水封水密性实验结果比较，充压伸缩式水封应主要解决两大问题。

(1) “低压封不住、高压稳不住”，即在重点解决橡胶耐高压情况下的法向压缩强度后，会出现低压区封头的膨胀量小，封头的接触宽度和接触应力较小，弥缝封堵性差，无法封水；在高压区，短时间能封住，长时间运行后，由于橡胶材料的流变性、应力松弛，



致使止水元件封头侧向抗弯刚度薄弱、封头接触应力逐渐松弛、耐屈曲性能差，导致水封在变压区长期运行后，不能维持原有的封水能力而射水。

(2) “低压封得住，高压受不住”，即低压区橡胶外伸膨胀量满足封水，但高压区时，由于材料流变、应力松弛而使其或是接触应力达不到、或是橡胶长期受压下的耐屈曲性能差，导致水封在高压区不能持久保证封水效果。此外，由于水头高、库压大、背压大，致使止水元件变形过大，影响到止水元件翼头的接触宽度和接触应力变小，导致背压腔的水从压板和座板间缝隙射出，也是高压受不住的原因之一。

针对这些情况，国内水封橡胶厂与水工研究机构进行合作，一方面不断改变配方，有针对性地对橡胶的各项力学性能指标进行增强改性；另一方面在止水元件结构型式的设计上，根据止水元件的翼头、封头、肢臂在水封整体结构上工作性质的不同，采用多种材质整体复合的工艺，比如肢臂对材料韧性与扯断伸长指标要求更苛刻；封头的法向压缩性能要求适中（不能太高、也不能太低），侧向抗弯刚度要求高；翼头的压缩应力和接触宽度要满足背压腔高压密闭的需要，其他性能指标可不苛求。这样就对多种性质的材质“各取所需、各尽所能”，实现了综合性能强大的构件设计。

充压伸缩式水封的主要优点有以下几点。

(1) 能适应闸门的变形。在闸门面板受到水压力作用后，产生弹性变形，加上加工、安装精度及温度变化等因素的影响，会使闸门后移而导致橡胶止水元件封头与闸门门体止水面板脱离，发生缝隙流。伸缩式水封利用背压能使止水元件的封头产生较好变形而始终紧压在闸门门体止水面板上，从而起到良好的封水作用。

(2) 减小闸门启闭力容量和延长橡胶止水元件的使用寿命。充压伸缩式水封结构在闸门开启前，将所加背压取消，橡胶止水元件封头向内缩回而脱离门体止水面板，从而使闸门启闭力减小，同时延长止水元件橡胶的使用寿命。

(3) 由于系统装置是管路连接，相应的动力和控制设备布置灵活，可以安装在环境较好、检修和维护方便的地方。

主要不足有以下几点。

(1) 由于止水元件伸缩量的限制，伸缩式水封止水元件的封头与闸门门体止水面板之间不允许有较大的间隙，止水在充压或卸压时能否均匀地沿法线方向外伸至设计高度或回缩至原位，取决于止水元件橡胶制品的力学性质、结构体型、压力腔的尺寸和止水压板型式等一系列参数。因此对水封的材质、外形尺寸、水封结构制造精度、安装误差、检修及维护等方面要求均较苛刻。

(2) 在多泥沙水流条件下，止水元件的移动间隙及充水腔容易被泥沙堵死，使水封伸缩功能减弱或失效。

(3) 启闭闸门时水封紧贴门体止水面板，对面板的加工制作和安装精度以及水封的耐磨性提出了更高的要求。

(4) 止水元件封头的头部伸缩量有限。

综上所述，充压伸缩式水封是一种止水高效的高压闸门水封型式，经过多年多项工程的实验和应用，已越来越成熟。国外对充压伸缩式水封的研究始于20世纪七八十年代，并取得了一定的运行实践经验和科学实验研究成果。例如前苏联托克托古尔水电站的5m