

大连理工大学教授学术丛书

高效消能工

Effective Energy Dissipators

倪汉根 著



DUTP

大连理工大学教授学术丛书

高效消能工

倪汉根 著

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高效消能工/倪汉根著. —大连:大连理工大学出版社,
2000. 10

(大连理工大学教授学术丛书)

ISBN 7-5611-1636-5

I. 高… II. 倪… III. 消能建筑物(水利) IV. TV653

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 19899 号

大连理工大学出版社出版发行

大连市凌水河 邮政编码 116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4708898

E-mail:dutp@mail.dlptt.ln.cn

URL:<http://www.dutp.com.cn>

大连海事大学印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 字数:276 千字 印张:11 插页:4
印数:1—3000 册

2000 年 10 月第 1 版

2000 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑:水舟刘杰

责任校对:徐怀书

封面设计:孙宝福

定价:28.00 元

序

水库一般都需泄洪,泄洪都需消能。

据说,最古老的消能元件是阶梯形溢流面。但进入 20 世纪以后,底流消能、屏流消能和挑流消能成了开敞式溢洪道的三种主要消能方式。有消能室的有压泄洪隧洞和竖井溢洪道则采用另外的消能方式。

水流借消能元件把动能转化成势能与热能的机制非常复杂,目前靠理论研究或数值模拟还不能得到设计所需的可靠结果,所以仍以水力模型试验为获得设计所需数据的主要手段。但是,正确说明物理现象和实验结果以及预测尚未实验的过程则只能依赖于进一步的理论研究和数值模拟研究。

用水力学的观点研究消能机制,主要属于水工水力学的框架;利用水力学基本原理,开发新的消能元件、创造新的消能方式,则同时属于水工水力学和水工建筑物的范畴。前者的发展余地已经非常有限,后者有着无限的创造空间。

科学研究的动力是生产实践的需要。

国内的水能资源很大部分在中国的西部,它们的特点是坝高、河谷狭、泄洪量大,泄洪能率可达上亿千瓦,因此消能与防冲难度很大,而消能是问题的主导方面,因此迫切需要研究高效消能工,它和泄洪建筑物的选择和投资有关,也和枢纽的安全运行密切有关。

近 20 多年,我国的水利工作者在引进国外先进消能技术的同时对消能元件和消能方式做了很多创新性的研究和设计

工作。如河北潘家口、辽宁白石水库分别采用了宽尾墩和异形宽尾墩挑流消能,安康、岩滩、五强溪等工程采用了宽尾墩(异形宽尾墩)-(底孔)-消力池(加 T 形墩等)方式的组合消能,宽尾墩是中国人的创造。龙羊峡、东江等水库则采用了窄缝挑流的先进消能技术。由于大型导流洞改建永久泄洪洞的需要,开展了洞内消能工的研究,并在黄河小浪底水库率先建成了大型多级孔板消能泄洪洞。对水平螺旋流和旋流式竖井溢洪道等内消能技术也进行了一定的研究。

本书的目的就是为了总结这些已有的先进消能技术和研究成果,也是为了推动进一步研究、改善、发展和推广这些先进的消能技术。

国内外的先进消能元件和消能方式是很多的,但由于作者近 10 多年的研究工作只涉及孔板、水平螺旋流、旋流式竖井溢洪道、窄缝挑流和宽尾墩,所以本书只包括这五部分内容。

国内外尚无同类的书。本书反映了部分高效新消能技术,反映了中国人的创造;基本涵盖了国内外的主要研究成果,也包括了作者的研究成果;同时注意了水力现象的物理说明、控制方程的理论推导、现象的水力计算与工程的水力设计;适当安排了例题。

本书可供水工专业的科研、教学和工程技术人员参考,也可作为该专业研究生教材和本科高年级学生的教学参考书。

著 者

2000 年 1 月于大连

目 录

第一章 孔板消能	1
1.1 概述	1
1.2 孔板的能量损失系数 ξ	3
1.2.1 孔板段的水流形态	3
1.2.2 孔板的能量损失系数 ξ 及其影响因素	4
1.3 最小压强系数 $C_{p_{\min}}$	12
1.4 孔板下游水流的脉动特性	17
1.5 孔板的空化特性	21
1.5.1 空化数与初生空化数	22
1.5.2 单级孔板的实测初生空化数(非减压条件)	24
1.5.3 多级孔板的实测初生空化数与比尺效应	33
1.5.4 孔板空化的两种类型	41
1.5.5 估计单级孔板初生空化数的经验公式	46
1.5.6 孔板的初生空蚀数	50
1.6 多级孔板水力设计的等空化原则	53
1.7 竖井孔板组合溢洪道	56

3-2-1

第二章 水平螺旋流消能工	62
2.1 螺旋流消能的形式和布置	62
2.1.1 起旋装置的类型	62
2.1.2 起旋装置的布置	66
2.2 水平螺旋流消能的室内试验	67
2.2.1 单股切向引水螺旋流消能的室内试验	67
2.2.2 同轴异向螺旋流消能试验	73
2.3 水平螺旋流消能工的水力计算	77
2.3.1 过流能力(引水道中无控制闸门)	78
2.3.2 急流、缓流、临界流	81
2.3.3 引水道中有控制闸门时的水力计算	83
2.3.4 引水道的转角 β 和临界水头 H_{2c}	87
2.3.5 出水道的水力计算	89
2.3.6 同轴反向旋流消能泄水道的水力设计	122
第三章 旋流式竖井溢洪道	132
3.1 概述	132
3.2 旋流式竖井泄水道的体形	138
3.2.1 旋流式竖井泄水道的组成	138
3.2.2 蜗室的形状	139
3.2.3 控制闸门的位置	139
3.2.4 竖井与出水段的连接	141
3.3 旋流式竖井泄水道的水力特性	142
3.3.1 过流能力	142
3.3.2 蜗室及锥形渐缩管的水力特性	150

3.3.3 竖井中的水流特性	156
3.3.4 旋流式竖井溢洪道的总消能率 (不包括水平出水段)	181
3.3.5 坝身竖井旋流泄洪消能的设想	183
3.3.6 对旋流式竖井溢洪道的评价	191
第四章 窄缝式消能工	193
4.1 已建窄缝消能工及其体形简介	193
4.1.1 国内外若干已建窄缝消能工简介	193
4.1.2 窄缝消能工的一般体形	197
4.2 窄缝消能工的水力特性	201
4.2.1 流态的一般描述	201
4.2.2 收缩段中冲击波的主要特征	203
4.3 窄缝消能工的体形设计之一	230
4.3.1 收缩比 B'/B	230
4.3.2 收缩段长度	233
4.3.3 直线收缩段设计	234
4.3.4 曲线形与多级直线收缩边墙	244
4.4 窄缝消能工体形设计之二	244
4.4.1 辐射形收缩段的水力特性	244
4.4.2 多级直线收缩段设计(1)	246
4.4.3 多级直线收缩段设计(2)	252
4.4.4 收缩段出口位置的确定与级数的选择	255
4.4.5 多级直线收缩段挑射水股落水范围 计算及出口 dh/dR 的选择	263

第五章 宽尾墩·····	267
5.1 宽尾墩的几何参数及水力特性 ·····	268
5.1.1 宽尾墩的几何参数 ·····	268
5.1.2 宽尾墩的水力特性 ·····	269
5.2 宽尾墩-消力池联合消能工 ·····	274
5.2.1 宽尾墩-消力池水力特性的试验研究 ·····	275
5.2.2 宽尾墩-消力池的水力计算方法 ·····	289
5.3 宽尾墩-挑流消能 ·····	319
5.3.1 潘家口枢纽宽尾墩-挑流消能的试验结果 ·····	319
5.3.2 宽尾墩收缩跌流的水力特性 ·····	322
5.3.3 异形宽尾墩-挑流消能 ·····	324

Contents

Chapter 1 Orifice Energy Dissipator	1
1.1 Introduction	1
1.2 Dissipation Coefficient of Orifice	3
1.2.1 Flow Pattern Observed Near Orifice Section	3
1.2.2 Orifice Dissipation Coefficient and It's Affecting Factors	4
1.3 Minimum Pressure Coefficient	12
1.4 Fluctuation Characteristics of Flow Down Stream from Orifice	17
1.5 Cavitation Characteristics of Orifice	21
1.5.1 Cavitation Number and Incipient Cavitation Number	22
1.5.2 Incipient Cavitation Numbers Measured From Single Orifice	24
1.5.3 Incipient Cavitation Numbers Measured From Multi-orifice and It's Scale Effects	33
1.5.4 Two Kinds of Orifice Cavitation	41
1.5.5 Empiric Formula to Estimate Incipient Cavitation Number of Single Orifice	46
1.5.6 Incipient Cavitation Damage Number of	

Orifice	50
1.6 Equal Cavitation Degree Method for Multi-orifice	
Design	53
1.7 Shaft-orifice Spillway	56
Chapter 2 Energy Dissipation with Horizontal	
Swirling Flow	62
2.1 Types and Arrangements of Swirling Flow Energy	
Dissipator	62
2.1.1 Installations for Flow Swirling	62
2.1.2 Arrangements of Swirling Flow System	66
2.2 Experimental Results of Horizontal Swirling	
Flow Obtained from Laboratories	67
2.2.1 Experimental Results of Swirling Flow with	
Single Tangential Incoming Flow	67
2.2.2 Experimental Results of Co-axial	
Contrarotation Swirling Flow	73
2.3 Hydraulic Calculations of Horizontal Swirling	
Flow	77
2.3.1 Flow Formula (Approach Channel without	
Control Gate)	78
2.3.2 Rapid Flow, Subcritical Flow and Critical	
Flow	81
2.3.3 Hydraulic Calculations when Approach	
Channel with Control Gate	83

2. 3. 4	Deflection Angle of Approach Channel and Critical Water Head H_{2c}	87
2. 3. 5	Hydraulic Calculations of Outlet Pipe	89
2. 3. 6	Hydraulic Design of Co-axial Contrarotation Swirling Flow Sluiceway	122
Chapter 3	Shaft-Swirling Flow Spillway	132
3. 1	Introduction	132
3. 2	Configuration of Shaft-swirling Flow Sluiceway ...	138
3. 2. 1	Composition of Shaft-Swirling Flow Sluiceway	138
3. 2. 2	Pattern of Vortex Chamber	139
3. 2. 3	Location of Control Gate	139
3. 2. 4	Conjunctions of Shaft and Outlet Pipe	141
3. 3	Hydraulic Characteristics of Shaft-swirling Flow Sluiceway	142
3. 3. 1	Discharge Capacity	142
3. 3. 2	Hydraulic Characteristics of Vortex Chamber and Conical Converging Tube	150
3. 3. 3	Flow Characteristics in Shaft	156
3. 3. 4	Total Dissipation Rate of Shaft-swirling Flow Sluiceway (except outlet pipe)	181
3. 3. 5	Dams with Shaft-swirling Flow Sluiceway	183
3. 3. 6	Comments on Shaft-swirling Flow Sluiceway	191

Chapter 4 Slit-type Buckets	193
4.1 Introduction	193
4.1.1 Introduction of Some Slit-type Buckets	193
4.1.2 Configurations of Slit-type Buckets	197
4.2 Hydraulic Property of Slit-type Buckets	201
4.2.1 Flow Pattern	201
4.2.2 Shock Wave in Contraction Section	203
4.3 Configuration Design of Slit-type Buckets(一)	230
4.3.1 Contraction Ratio B'/B	230
4.3.2 Length of Contraction Section	233
4.3.3 Design of Contraction Section with Straight Line Side Walls	234
4.3.4 Design of Contraction Section with Curved and Multiline Side Walls	244
4.4 Configuration Design of Slit-type Buckets(二)	244
4.4.1 Hydraulic Characteristics of Radial Contraction Section	244
4.4.2 Design of Contraction Section with Multiline Side Walls (1)	246
4.4.3 Design of Contraction Section with Multiline Side Walls (2)	252
4.4.4 Determination of Exit Location and Choice of Degree	255
4.4.5 Choice of dh/dR at Exit of Bucket and	

Calculation of Nappe	263
Chapter5 Spillway with Flaring Piers	267
5.1 Geometric Parameters and Hydraulic Characteris- tics of Flaring Piers	268
5.1.1 Geometric Parameters of Flaring Piers	268
5.1.2 Hydraulic Characteristics of Flaring Piers	269
5.2 Flaring Piers-Stilling Basin	274
5.2.1 Hydraulic Experiments of Flaring Piers- Stilling Basin	275
5.2.2 Hydraulic Calculations of Flaring Piers- Stilling Basin	289
5.3 Flaring Piers-Deflecting Buckets	319
5.3.1 Experimental Results of Flaring Piers- Deflecting Buckets	319
5.3.2 Hydraulic Characteristics of Drop From Flaring Piers	322
5.3.3 Unusual Flaring Piers—deflecting Buckets ...	324

第一章 孔板消能

1.1 概 述

在建设大型水利枢纽时常开挖直径很大的导流洞,把这种大型导流洞改建成永久性泄洪洞或放空洞可以节省大量投资。但要把低水头运行的导流洞改建为在高水头下运行的永久性泄洪洞或放空洞,必须解决相应的消能防冲及高速水流引起的次生问题。

对高水头大直径泄洪洞,洞内消能是一个应认真考虑的方案。它的比较明显的优点是减轻对洞身壁面的强度要求和对下游河床的冲刷,避免挑流消能等消能方式引起的严重雾化现象。

洞内消能已不是新的概念。加拿大麦加坝的两条导流洞改建成永久性泄洪洞时就采用了洞内消能方案^[1]。该坝建成于 1972 年,坝高 242 m。两条导流洞的长度分别为 893 m 和 1093 m,最大水头 190.9 m,采用“洞塞”消能。即在直径为 13.72 m 的混凝土隧洞中做一个塞子,这个塞子中有三根直径 3.51 m 的管道。这样,过流断面面积从 147.84 m^2 突缩至 29.03 m^2 ,再突扩到 147.84 m^2 ,主要利用突扩消减水流的机械能,如图 1.1 所示。

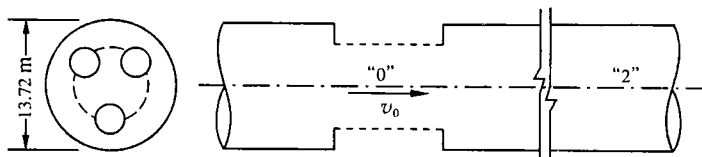


图 1.1 麦加(Mica)坝洞塞消能示意图

对麦加坝的消能方式曾进行过空化与空蚀的模型试验。模型的突扩段是 305 mm 的钢管,内衬 32 mm 厚的混凝土壁(实有过流断面的直径为 241 mm),在高水头下进行空化与空蚀试验,试验时的 $v_0 \approx 48$ m/s,空化数 σ 按式(1.1)定义:

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{\rho v_0^2 / 2 + (p_0 - p_2)} \quad (1.1)$$

试验结果是:初生空化数 $\sigma_i \approx 2.5$,当水流空化数 $\sigma \approx 2.0$ 时有轻微噪声, σ 保持 1.0 试验 20 h 后混凝土壁表面略有不平整,保持 $\sigma \approx 0.58$ 时试验 20 h 后壁面发生严重空蚀。麦加坝在 $\sigma \approx 3$ 时的实际运行表明情况良好,没有发生空蚀现象。参考点“0”和“2”都示于图 1.1。

“洞塞”消能虽然包括突缩消能和突扩消能两部分,但突缩消能量比突扩消能量小得多,所以它的实质是突扩消能。根据麦加坝的运行经验推理,采用孔板消能也应该是可行的,且孔板比“洞塞”易于施工。

人们早就知道孔板具有很高的阻力系数,孔板流量计就是利用了它的这一特性。但孔板作为大型泄洪洞的消能元件,则是在我国黄河小浪底水利枢纽中首次实现。小浪底枢纽的泄水建筑物中包括三条由导流洞改建的龙抬头孔板泄洪洞,导流洞的直径略大于麦加坝,是 14.5 m,最大落差 150 m,最大单孔运行泄洪量为 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

为了论证上述方案的可行性,进行了一系列的模型试验,并于 1987 年在我国碧口水库的排沙洞加建两级孔板,进行原型观测。碧口水库排沙洞的原洞径为 4.4 m,经改建后孔板段的洞径为 3.8 m,孔板的孔径为 2.62 m,原型观测时的最大水位差为 61.3 m,最大的过流量是 $87.40 \text{ m}^3/\text{s}$,开创了泄洪洞孔板消能的先例,取得了包括流速、压强、消能率、空化空蚀、脉动与振动等内容的极有价值的观测资料^[2]。

1.2 孔板的能量损失系数 ξ

孔板作为洞内消能的消能元件时,人们首先关心的是它的消能率或能量损失系数,而能量损失系数决定于孔板段的流动形态。

1.2.1 孔板段的水流形态

孔板前后的水流形态简示于图 1.2, D, d 分别为洞径和孔径, $\beta = \frac{d}{D}$ 称为孔径比。

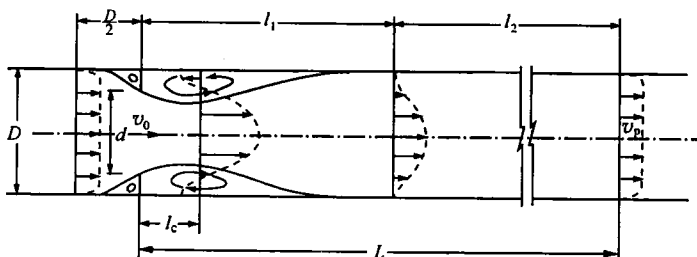


图 1.2 孔板前后流态示意图

由图 1.2 可见,孔板前包括水流收缩区和角隅旋涡区,孔板后包括水流收缩区、扩散区、回流区和流速分布恢复区。一般情况下,在孔板前 $0.5D$ 处的流速分布基本上不受孔板的影响,孔板前角隅涡的强度比较弱。回流区的长度 l_1 和水流雷诺数 Re_d 有关:先随 Re_d 的增大而增大;当 $Re_d > 5 \times 10^4$ 以后, l_1 基本上不再变化,稳定的相对回流区长度 $\frac{l_1}{D}$ 和 β 的关系列于表 1.1^[3]。孔板后回流区内的流速梯度和涡粘性系数都比较大,水流的动能主要在回流区内耗散。从回流区终点处很不均匀的流速分布逐渐过渡到与洞内糙率相应的正常流速分布是在流速分布恢复区内完成的,它的长度 l_2 约为 l_1 的两倍,即 $L \approx 3l_1$ 。