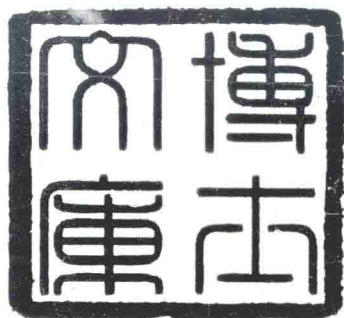


博士文库



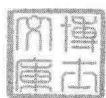
孔板式消能工 水力学特性

KONGBANSHI XIAONENGGONG
SHUILIXUE TEXING

艾万政 著



海洋出版社



本书得到长江科学院开放研究基金资助项目
(项目编号: CKWV2015216/KY) 资助

孔板式消能工水力学特性

艾万政 著

海洋出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

孔板式消能工水力学特性 / 艾万政著. —北京: 海洋出版社, 2015. 9
ISBN 978 - 7 - 5027 - 9225 - 1

I. ①孔… II. ①艾… III. ①消能建筑物 (水利) - 水力学 - 研究
IV. ①TV653

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 200647 号

责任编辑: 郑跟娣

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店发行所经销

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 8.75

字数: 207 千字 定价: 38.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

随着高坝建设的发展，高坝下泄水流“深峡谷、高水头、大流量、多泥沙”的特点更为突出。以溪洛渡水电工程为代表的高坝泄洪能量达到世界之最，泄洪消能成为高坝建设最关键的技术问题之一。在传统的消能方式基础上，新型消能工的开发和应用，一直是水利水电工程建设的重要问题。因地制宜将导流洞改建成永久泄洪洞，在泄洪洞内进行合理消能，有利于导流洞的利用，既便于工程泄水建筑物的布置，又可以减少工程投资。

孔板和洞塞消能是洞内消能的重要途径，在洞内利用水流的突缩和突扩进行消能的方式，统称为突缩突扩式内消能工。孔板和洞塞消能工具有经济、布置简单和消能效率高的特点，国内外对此类消能工开展了大量的研究，取得了长足的进展。对于孔板类消能工，仍然有一些问题值得研究。

其一，作为突缩和突扩式消能工，孔板和洞塞在消能机理上有相似之处，但是孔板与洞塞由于在流态上的显著差异，致使孔板与洞塞在消能特性和空化特性方面也有区别。因此，从流态上，区划孔板与洞塞仍然是一个重要的问题。其二，孔板利用水流的突缩和突扩形成回流区，通过回流区强烈的水流剪切和摩擦来消能。但是在以往的研究中，关于孔板的回流区长度特性以及孔板厚度对消能的影响的定量研究相对较少。此外，建立孔板消能工水头损失系数与其结构参数和水力参数的定量关系，对于此类消能工的设计和运用也有重要的参考作用。其三，孔板与洞塞在体型上有区别，导致二者在消能特性及空化特性方面存在区别，因此有必要探讨孔板与洞塞这两类消能工水力学特性的差异问题。其四，孔板有较多的体型，如平头孔板、锐缘孔板、坡形进口孔板等，由于体型差异各类孔板在水力学特性方面各有特点。从方便实际工程应用角度出发，有必要探讨孔板体型对其水力学特性的影响问题。其五，孔板空化特性直接关乎孔板泄洪洞的安全，孔板初生空化数与相关体型要素及水力学要素之间的关系，

有必要进一步研究。其六，在综合考虑孔板的消能特性和空化特性的基础上，在多级孔板设计中，各级孔板的结构参数，如孔径比、孔板的厚度等的合理选取和协调是孔板消能工运用的一个重要问题。

针对以上问题，本书通过理论分析，运用数值模拟和物理模型试验的方法，对孔板与洞塞的划分、孔板的消能特性、孔板的空化特性和多级孔板设计等方面进行了较系统的研究。本书的主要创新成果包括以下几项。

(1) 提出了临界厚度的概念，以水流收缩后形成的射流是否达到消能工下边缘为判断标准，建立了孔板与洞塞流动的划分方法。

(2) 通过理论分析和数值模拟的方法，建立了孔板的能量损失系数和孔板孔径比和厚度定量的经验表达式，并用物理模型试验对该表达式进行验证。

(3) 对不同体型孔板以及孔板与洞塞进行了比较研究，并得出了一些有益的结论，以便于工程实际应用。

(4) 通过数值模拟研究，建立了孔板最低壁面压强系数的经验表达式，并用减压模型试验论证了孔板空化特性与相关因素之间的关系。

(5) 在理论分析相关研究成果的基础上，定义了等空化安全余量（即各级孔板的水流空化数与初生空化数之差相等），提出了多级孔板设计的一般原则和方法，并以一个案例，用数值模拟和物理模型试验（包括减压模型和常压模型）对两级孔板消能方案的设计结果进行了验证。

本书得以顺利出版应该感谢长江科学院开放研究基金资助项目（项目编号：CKWV2015216/KY）的资助，更应该感谢我的导师吴建华教授，全书由吴老师主审。吴老师对本书的出版提出了很多指导性的意见和建议，没有吴老师的指导，本书不可能出版。另外，还感谢本书的相关参写人员，中国电力建设集团中南勘测设计研究院周琦，长江水利科学研究院李波，对他们的辛勤劳动表示感谢！

当然对问题的看法和研究不可能至善至美，本书还会有很多不足之处，希望广大水利专家和读者批评指正。

作者

2015年6月

目 次

1 绪论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 孔板式消能工发展历程	(8)
1.3 孔板式消能工研究现状	(11)
1.4 本书研究的主要内容和技术手段	(25)
2 孔板与洞塞的划分	(27)
2.1 临界厚度概念的提出	(27)
2.2 临界厚度的量纲分析	(28)
2.3 基于临界厚度的数值模拟研究	(29)
2.4 临界厚度特性分析	(40)
2.5 孔板与洞塞的划分方法	(44)
2.6 本章小结	(44)
3 孔板能量损失系数	(45)
3.1 孔板能量损失系数理论分析	(45)
3.2 孔板消能特性数值模拟	(47)
3.3 孔板消能特性试验	(53)
3.4 本章小结	(62)
4 孔板与洞塞水力学特性比较	(63)
4.1 缩放式消能工水力学总体特性	(63)
4.2 孔板与洞塞水力学特性对比	(65)
4.3 本章小结	(70)
5 不同体型孔板水力学特性比较	(71)
5.1 孔板体型研究概述	(71)
5.2 不同体型孔板回流区长度比较	(72)

5.3	不同体型孔板空化特性比较	(73)
5.4	不同体型孔板消能特性比较	(74)
5.5	本章小结	(75)
6	孔板后水流恢复特性	(76)
6.1	孔板后水流恢复特性概述	(76)
6.2	孔板后水流恢复长度的影响因素	(76)
6.3	孔板后水流恢复长度数值研究	(77)
6.4	孔板后水流恢复长度物理模型试验研究	(79)
6.5	本章小结	(83)
7	孔板空化特性	(84)
7.1	空化对泄水建筑物的破坏	(84)
7.2	影响孔板空化的因素	(88)
7.3	水流脉动对孔板空化的影响	(90)
7.4	孔板最低壁面压强系数	(94)
7.5	孔板空化特性试验	(97)
7.6	本章小结	(103)
8	多级消能孔板设计	(104)
8.1	孔板水力特性综合分析	(104)
8.2	多级孔板设计原则	(105)
8.3	多级孔板的孔板间距	(109)
8.4	多级孔板设计实例	(111)
8.5	多级孔板设计试验研究	(112)
8.6	本章小结	(118)
9	结论与展望	(120)
9.1	重要结论	(120)
9.2	未来展望	(121)
	参考文献	(122)

1 绪 论

本章对孔板式消能工研究现状进行回顾与评述，针对目前孔板式消能工需要解决的问题，提出本书的研究内容及采取的技术路线。

1.1 问题的提出

1.1.1 传统的消能方式

现代的大坝坝高已经超过 300 m 等级。高坝下泄水流的特点是“深峡谷、高水头、大流量、多泥沙”。如在建的溪洛渡水电工程，坝高达到 278 m，下泄流量达到 $50\,311\text{ m}^3/\text{s}$ ，其泄洪功率近亿千瓦。下泄水流具有如此大的能量，如果不进行合理消能，势必会对工程造成安全隐患。常见的消能方式有挑流消能、底流消能、面流消能以及它们的改造形式等。

挑流消能^[1]是高坝消能最常见的消能方式。它是借助泄水道末端设置的挑坎，使下泄高速水流自由抛射，在空气中扩散、掺气乃至碰撞，同时利用水舌跌入水垫形成淹没射流的紊动扩散来消散下泄水流的巨大动能，使之与远离坝体的下游缓流相衔接，从而减轻对下游河床的冲刷，确保大坝或泄水道的安全泄洪。这种消能方式的优点是：工程设施简易；挑流鼻坎的体形变化具有很大的灵活性，适应下泄单宽流量和尾水变幅较大的水流，并且可以利用不同的坎型改变射流形状与分散度，灵活调整水舌入水点和入水单位面积的流量；改善消能效果，减少下游防冲措施，节省工程投资。因此，挑流消能在国内外泄水工程中采用甚多，特别对于高坝枢纽，它的应用更为广泛。挑流消能于 1933 年被首次应用于西班牙的里科拜约（Ricobayo）重力拱坝的溢洪道出口，并于 1936 年首次应用于法国的马立奇（Marèges）拱坝的滑雪式溢洪道上。我国较早采用挑流消能方式之一

的是建于 1953 年的丰满水电站, 该水电站是由底流消能改建而成, 且收到了良好的消能效果。

底流消能又称为水跃消能, 也是一种古老的消能方式, 在中低水头的溢流坝中应用较多。底流消能是利用高速射流在消力池内受到尾水的顶托后, 通过水跃转变为缓流, 将射流中所含有的巨大动能, 一部分转换为尾水水深外, 其余部分则通过旋滚转化成热能。底流消能的优点是经消力池完成主要消能作用后, 出流为缓流, 流态较稳定, 冲刷能力较小, 一般不会发生严重的局部冲刷; 此外, 底流消能的雾化问题也较小。底流消能在现今高坝泄洪建筑物中所占的比例较小, 但其中也不乏一些成功的工程实例。俄罗斯的萨扬-舒申斯克 (Sayano-Shushensk) 坝, 坝高 242 m, 设计流量 $13\,600\text{ m}^3/\text{s}^{[2-3]}$, 是目前世界上采用底流消能的最高坝, 它代表了底流消能的世界水平^[2-3]。我国采用底流消能工的泄量最大工程是五强溪水电站, 坝高 85.5 m, 设计流量 $49\,566\text{ m}^3/\text{s}^{[2-3]}$ 。

面流消能常用的有跌坎式和戽斗式两种。前者坎高较大, 挑角较小; 后者则相反。跌坎式消能工利用设置在溢流坝或溢洪道末端的垂直跌坎将下泄水股送到下游表面, 使水股在水流表面自由扩散, 在表面主流与河床之间形成旋滚。这种旋滚不但起着消能作用, 而且使高流速水流靠近上部, 有利于减弱水流对河床的冲刷。一般不需设置消力池或护坦, 以节省工程造价。戽斗式消能工是在泄水建筑物末端设置半径较大、挑角略大的反弧戽斗, 射流水股以较大的曲率挑离戽斗时可产生较大的涌浪, 当尾水较高时在戽斗内产生强烈的旋滚, 形成典型的“一波三滚”流态。面流消能的流态对尾水位变动非常敏感, 在某些尾水位下游水面波动较大, 波动沿河道传播较长, 对于岸坡稳定、电站运转以及航运都可能产生不利影响。并且在泄流时, 闸门必须坚持同步开启方式, 否则达不到设计所要求的流态, 极易造成工程破坏。所以对于高水头大流量泄洪建筑物, 采用面流消能的工程实例不多。较晚建造的石泉水电站溢流坝, 经过多家的试验研究和较充分的论证, 最后采用了 45° 挑角的单圆弧大戽斗面流消能, 建成后运行情况还是相当好的^[4]。

挑流消能、底流消能和面流消能这 3 种传统消能方式在过去坝工建设中占据主导地位。近 30 年来, 随着我国高坝建设的发展, 在外部泄洪消能

方式上有了新的发展。这种新的发展主要体现在对这 3 种传统消能方式的改造方面^[5-7]。例如,对于挑流消能而言,挑流鼻坎的形式早期为连续坎或差动坎,但是近年来在高坝建设的推动下,发展了多种体型包括扩散坎、斜挑坎、扭曲坎、高低坎、长短坎、舌状坎、窄缝坎和掺气分流墩等。底流消能的改造是随着低弗氏数,大单宽流量的消能问题而展开的。低弗氏数水跃的显著特点是在消力池内水流消能不充分,消能率一般为 20%~40%,跃后垂线流速分布不均匀,水跃后水面波动较大。为解决低弗氏数水跃消能的问题,常常采取如下改造措施:适当降低单宽流量、扩宽消力池或设二三级消力池;采用各种辅助消能工以稳定水跃;增设消浪措施,使跃后水流能达到相对平静等。

传统的消能方式在一定程度上能够较好地解决消能问题,它们具有以下共同特点^[8]。

(1) 占地面积大。传统消能工不但其主体工程需要占据大量空间,而且还要修建一些辅助设施才能发挥消能作用。例如:挑流消能为了减小对下游河道的冲刷,还必须修建防冲设施;底流消能为了改变水跃区水流运动的边界条件,还必须辅以修建各种墩和坎等;有些消能工空蚀破坏的危险较大,为了减少空蚀的危险还要修建掺气减蚀设施^[9-13]。

(2) 工程造价大,浪费严重。一套完整的外部消能工的修建,少则几百万,多则上千万甚至上亿。另外,修建大坝时的导流洞在工程完工以后不能重新利用,造成极大浪费。

(3) 应用条件受限。对于每种传统消能方式不是在每个工程中都能应用,各种消能方式均有其实用条件。例如,对于尾水偏低但基岩较好的工程才能选择挑流消能方式;面流消能必须选择在丰水河上,且要求地质岩基好、中水头、低弗劳德数和下游通航要求不高的地域。

(4) 雾化问题严重。传统消能工在高速泄流时,水流会与空气或边界相互作用而产生雾化水流。这种雾化水流不但会使周围能见度下降,对航运造成不利影响,而且还会让两岸边坡不稳,发电设备受损,周围生活环境遭到破坏。

1.1.2 水电工程建设现状

人类社会的发展离不开能源。随着工业化程度加剧和人口的增加,人

类对能源的需求会越来越大。水能具有无污染和可再生利用的特点,是能源的重要组成部分,因此世界各国每年都要消耗大量的人力、物力来修建水电工程。近几年来,世界大坝的建设逐步向高水头和深峡谷方向发展,各种高坝层出不穷(国外高坝建设情况见表 1.1)。这主要是由两个方面的原因造成,一方面是科技的进步,为建设高坝提供了充分的技术保障;另一方面,世界上易于开发建坝的地方早已开发,未来建坝选址必然要向峡谷地区发展。峡谷地区一般地域狭小且水流落差较大,在这样的地域建坝必然水头也较高^[14]。

表 1.1 国外高坝建设情况

坝名	坝高/m	泄洪流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	所在国家	建造情况
罗贡 (Rogun)	335	3 500	塔吉克斯坦	已建成
努列克 (Nurek)	300	4 040	塔吉克斯坦	已建成
英古里 (Ingulska)	272	2 500	格鲁吉亚	已建成
奇科森 (Chicoasen)	261	17 370	墨西哥	已建成
埃尔卡洪 (El Cajon)	226	4 000	洪都拉斯	已建成
胡佛 (Hoover)	221.4	11 400	美国	已建成
姆拉丁其 (Mratinje)	220	2 200	南斯拉夫	已建成
格兰峡谷 (Glen Canyon)	216.4	7 815	美国	已建成
迪兹 (Dez)	203	6 000	伊朗	已建成
阿米尔·卡比尔 (Amir Kabir)	200	16 200	伊朗	已建成

在我国,深峡谷和高水头地域建坝的趋势显得尤为突出。我国水电建设与经济发展密切相连,在东部地区经济较发达,但可开发的水资源较少;在中西部地区经济欠发达,但可开发的水资源丰富。因此,我国未来水电建设必然向中西部转移。我国中西部水能资源的突出特点是河流的河道陡峻,落差巨大。发源于“世界屋脊”青藏高原的大河流长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江、怒江等,天然落差都高达 5 000 m 左右,形成了一系列世界上落差最大的河流,这是其他国家所没有的。按照国家制定的“西电东送”发展规划,到 2020 年底,西部地区的贵州、云南、四川水电

开发的总装机容量分别要达到 16 300 MW、53 100 MW 和 64 600 MW，开发程度分别达到 86%、54% 和 64%。这意味着我国未来大坝的建设也向着深峡谷和高水头方向发展^[15]。国内部分高坝建设情况见表 1.2^[16-19]。

表 1.2 国内高坝建设情况

坝名	坝型	坝高/m	泄洪流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	所在省份	建造情况
双江口	堆石坝	312	8 000	四川	在建
锦屏一级	拱坝	305	10 074	四川	在建
小湾	拱坝	292	20 683	云南	在建
溪洛渡	拱坝	278	50 311	云南	在建
糯扎渡	堆石坝	258	35 300	云南	在建
二滩	拱坝	240	23 900	四川	已竣工
水布垭	堆石坝	232	15 243	湖北	已竣工
构皮滩	拱坝	225	26 950	贵州	在建
龙滩	碾压混凝土重力坝	216	35 500	广西	已竣工
三峡	重力坝	181	102 500	湖北	已竣工

深峡谷高坝向泄洪消能提出了新的挑战，与一般的水利工程相比，其泄洪消能表现出的特点有以下几点。

(1) 水头高。溪洛渡和小湾的坝高接近 300 m。水头高导致流速大，一般均超过 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ，有的超过 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[20]。高速水流问题（脉动振动、空化空蚀、掺气雾化、磨损磨蚀、冲刷）十分突出。

(2) 大流量。如向家坝超过 $40\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，溪洛渡超过 $50\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[19]。

(3) 单宽流量大。由于我国的水电站多建设在河谷狭窄的地段，所以单宽流量都比较大。在过去，如果单宽流量达到 $100 \sim 150 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 就认为单宽流量比较大。可是现在，单宽流量已突破 $200 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，少数甚至接近 $300 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，如天生桥水利工程，其堰顶单宽流量达到 $335 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ^[19]。

(4) 泄洪功率大。很多高坝下泄功率达数千万千瓦，如溪洛渡水利工程，其泄洪功率达到近亿千瓦^[19]。带有如此巨大能量的水流需要安全下

泄,使泄洪消能任务相当繁重,给消能防冲也带来极大的困难。如何采取切实有效的措施来解决这一问题成为建坝技术的关键难题之一。

1.1.3 开展孔板式消能工相关研究的意义

深峡谷高坝下泄的水流具有高水头、大流量和泄洪功率巨大的特点。传统的消能方式不仅带来的雾化问题严重,而且如果在高坝下游修建传统消能工,还需要建设其他辅助的防冲设施。峡谷地区可开发利用的空间有限,传统消能方式应用于峡谷地区有时受到局限。另外,在深山峡谷地区修建高坝枢纽,坝址多位于峡谷河床,不宜采用河床分期导流,也不能应用明渠道导流,故有时需要采用隧洞导流方式。工程完成之后,如果采取传统消能方式而不对导流洞加以利用,那将造成巨大的浪费。如何将导流隧洞改建为永久性泄洪洞,是一项具有重大经济效益的工程,因此一直受到国内外广泛关注。如苏联拉波^[21]主持编写的《泄水建筑物水力计算手册》中关于水利枢纽工程施工导流的基本原则,就提出了“要论证导流建筑物作为永久泄洪建筑物和发电建筑物的可能性和完全地或部分地利用永久泄洪建筑物宣泄施工流量的可能性”。国外利用导流洞来泄洪的实例较多,例如,当前国外最大的导流洞为俄罗斯的布列衣和塔吉克斯坦努列克,导流洞尺寸均宽 17 m,高 22 m,前者两条导流洞均改建成永久泄洪洞,后者 3 条导流洞改建了两条^[22-24]。从坝高来看,国外坝高 200 m 级的工程,如加拿大的麦卡和新美浓坝都曾将导流洞给予利用。甚至在 300 m 级的水电工程中也有将导流洞充分利用的先例,如塔吉克斯坦的罗贡坝和努列克坝均有将导流洞改建为泄洪洞和放水孔的实践应用^[22-24]。然而在我国,由于受到一些客观因素的影响,导流洞永久利用偏低。我国在 200 m 以上的高坝工程中,将导流洞改建为永久泄洪洞的实例就很少。我国已建或拟建的 100 m 至 200 m 级坝高工程中,也只有大约三分之一的工程将施工导流洞利用为永久建筑物^[24-25]。

孔板式消能工是建设在建筑物内部,依靠孔板的特殊体型,急剧改变水流流态,在水流内部形成紊动掺混和涡旋来集中消耗水流的能量,降低水流速度,达到保护泄洪建筑物和泄洪消能的目的。与传统的消能工比较起来,孔板式消能工具有以下明显的特点:其一,孔板式消能工的泄洪洞

只需要把原来的导流洞适当改建即可,这样可以大大节约投资成本,优化布置结构;其二,孔板式消能工一般是在泄洪洞内完成消能,不但没有雾化问题,而且还可以最大限度地保护原生态河道;其三,孔板式消能工修建在地下,几乎不占用地面空间,能适应深峡谷地域有限的特点;其四,孔板式消能工具有良好的消能效果,且空化破坏风险也小。以黄河小浪底工程为例,小浪底工程中的三级孔板能把水流的流速从原来的 52 m/s 减少到不足 35 m/s ,且消能率高达 40% 以上^[26-27]。截至目前,还未有小浪底工程发生空蚀破坏的报道。

孔板式消能工与竖井式洞内消能工相比较,也具有自己的优势。虽然采用竖井消能方式消能效率较高^[28-32],但由于竖井段需要大量掺气,水气二相流在有压竖井段的动水压强很大,这样造成流态很差,必须平洞段排气^[33-35];同时竖井消能还会出现在洞尾明流转变为有压流,在出口处容易出现间断性气囊等不利的水流情况^[34,36];另外竖井结构比较复杂且安装难度大。例如,旋流竖井消能工不仅竖井段设计要很高要求,而且还要建造蜗室,而蜗室结构更加复杂。与竖井式洞内消能工相比,孔板式消能工具有布置简单和经济的优点^[37-39]。

孔板式消能工在消能机理上与洞塞类似。但是它们两者在流态上存在区别。传统的观点认为^[40-43],消能工的厚度是区分孔板与洞塞的关键,消能工的厚薄会导致在消能工内部出现以下两种流态:如果消能工比较薄,水流收缩后还来不及扩展到消能工边壁而直接进入下游泄洪洞,此类较薄的消能工通常被称作孔板。孔板流态如图 1.1 所示。如果消能工比较厚,水流就会在消能工内部形成一个收缩断面,然后扩大到整个消能工内壁并附壁流动,当流动到消能工末端时水流会再次扩展到整个泄洪洞,具有此类流态特征的消能工通常被称作为洞塞,也有人通常称其为厚孔板。洞塞流态如图 1.2 所示。关于孔板和洞塞的划分还只是一个粗略的概念,到目前为止还没有明确的区分标准,因此有必要对孔板与洞塞加以划分。

孔板式消能工布置简单且经济适用,因此,开展孔板式消能工水力学特性相关问题的深入研究是必要的。

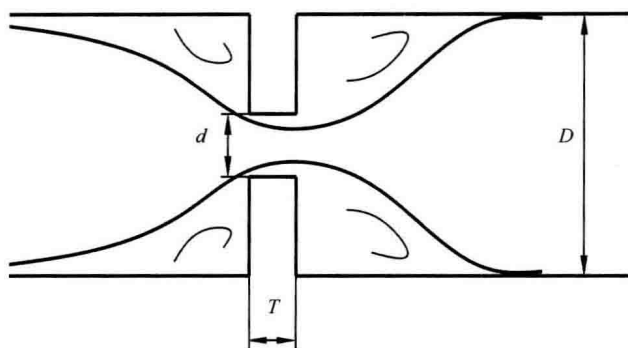


图 1.1 孔板流态

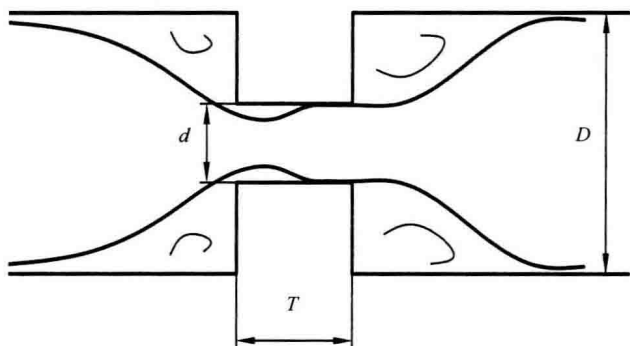


图 1.2 洞塞流态

1.2 孔板式消能工发展历程

早期的孔板和洞塞主要被应用于管道，前人通常在管道内部安装适当的孔板或洞塞以用于流体量测和管道节流等^[44-46]。后来随着科技的进步，孔板和洞塞被广泛应用于电子、化工和生物医学等各个领域^[47-51]，如在化学反应混合器和集成电路散热器上常常可以看到孔板或洞塞的应用。18世纪中叶，人们发现利用孔板或洞塞可以导致水流能量的损失。波达于1766年就系统地研究了突扩水流的水头损失，并提出了著名的波达公式^[52]。孔板和洞塞应用于水利消能始于20世纪70年代。当时在加拿大的

麦加大坝水利工程中^[53]，将两个间隔为 104 m 的钢筋混凝土塞安装于直径为 13.7 m 的导流洞内。洞塞在麦加大坝的应用开辟了缩放式内消能工在水利工程中应用的先河。我国于 1988 年的黄河小浪底工程采用三级锐缘孔板消能（图 1.3 和图 1.4）。当时三级孔板的泄洪洞是由内径为 14.5 m 的导流洞改建而成。小浪底工程是目前世界上最大的采用孔板式消能工的范例，其消能功率达 2 700 MW，消能总水头为 29.95 m，占总水头的 40.2%，其中第二级和第三级孔板的实测消能水头为 13.59 m，占总水头的 18.2%，消能效果极为显著^[54-55]。

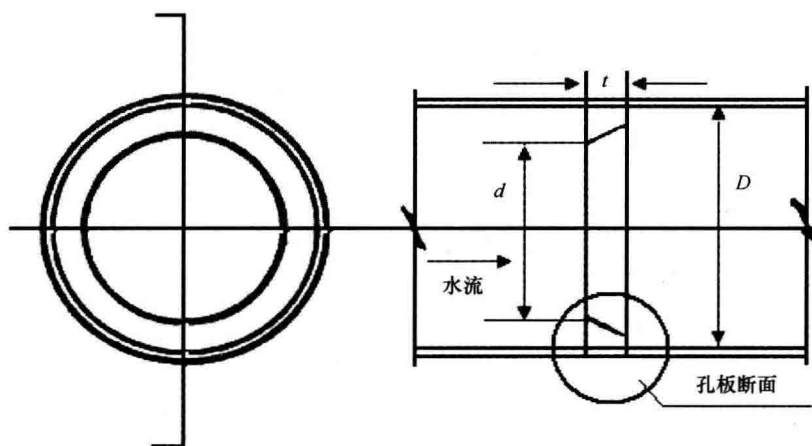


图 1.3 黄河小浪底孔板结构示意图

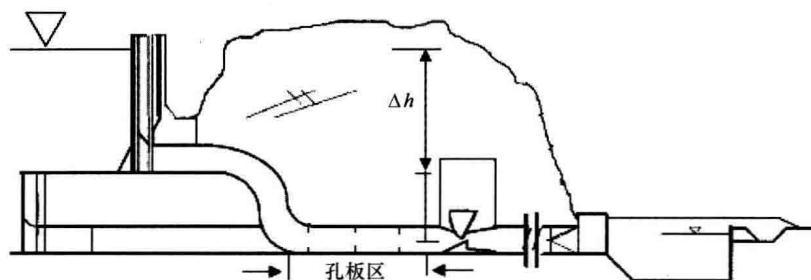


图 1.4 黄河小浪底孔板泄洪洞剖面图

孔板式消能工自从在大型水利工程中成功应用以后,到现在已经发展成多种体型,如孔板有平头孔板、锐缘孔板、平头加锐缘孔板和倒角孔板等^[56-57],洞塞有顺直洞塞、台阶洞塞、组合洞塞和收缩洞塞等^[43]。各种孔板和洞塞体型如图 1.5 和图 1.6 所示。虽然孔板和洞塞有很多体型,但平头孔板和顺直洞塞分别是孔板和洞塞的基本体型,其他体型都是在它们两者的基础上适当变形而成的。

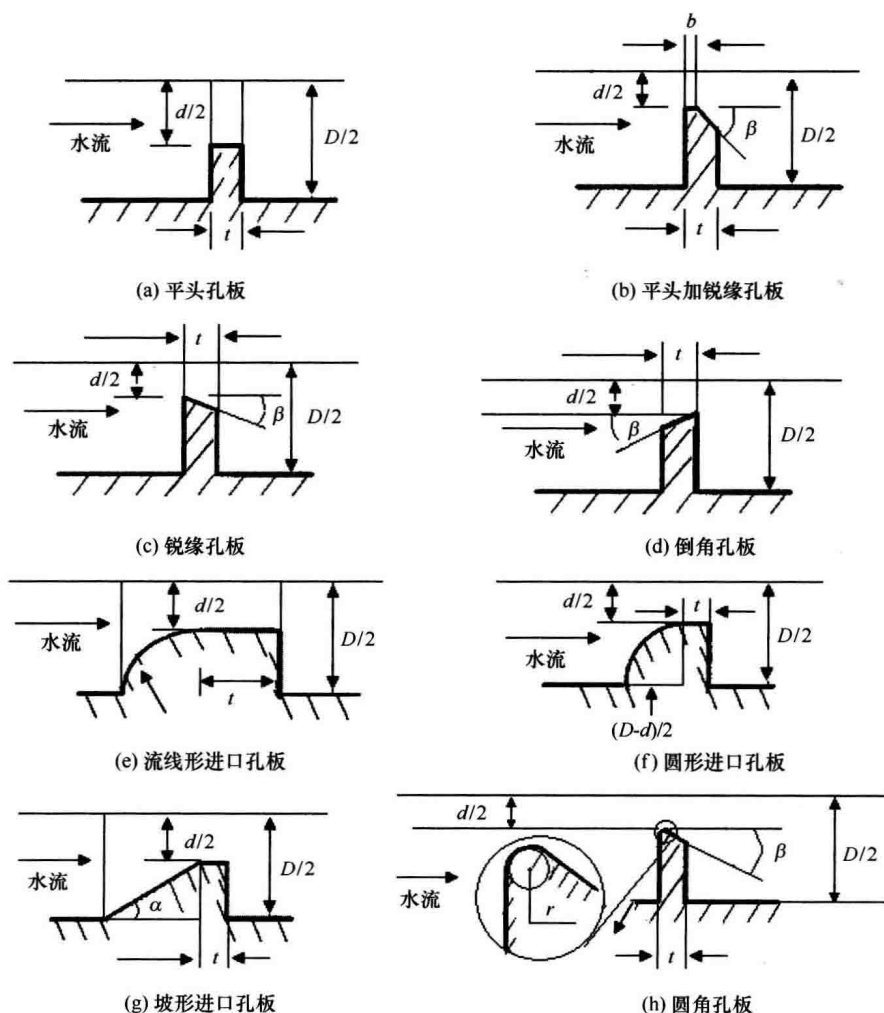


图 1.5 各种孔板体型