

高等学校教材

高水头泄水建筑物的 防蚀抗磨与消能

清华大学 丁则裕 编著

1470

水利电力出版社

高等学校教材

高水头泄水建筑物的 防蚀抗磨与消能

清华大学 丁则裕 编著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书旨在总结高水头泄水建筑物水力设计中的一些经验和教训，为高等院校水利工程专业的研究生、高年级大学生和进修生提供一本专业教材。

本书主要内容有：高水头泄水建筑物的空蚀及其防止措施；高水头泄水建筑物的磨损及抗磨材料；高水头泄水建筑物的消能。

2038/28

高等学校教材

高水头泄水建筑物的

防蚀抗磨与消能

清华大学 丁则裕 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 6.25印张 140千字

1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷

印数 0001— 1010 册

ISBN 7-120-00941-9/TV·308

定价1.35 元

前 言

随着我国水利事业的发展，高水头建筑物日益增多，而高速水流也给泄水建筑物的水力设计带来了不少问题，包括建筑物的空蚀、下游河床的冲刷、水流引起的振动以及泥沙对建筑物的磨损等。近10~20年来已有越来越多的专家、学者对这些问题给予重视。他们通过理论分析、室内试验以及原型观测，取得不少有价值的科研成果，并在工程实践中得到了验证。

本书旨在总结高水头泄水建筑物水力设计中的一些经验和教训，为高等院校水利工程专业的研究生、高年级大学生和进修生提供一本专业教材。主要内容是针对高水头泄水建筑物的体形、空蚀、防蚀措施、磨损、抗磨材料、消能防冲措施及其新进展等几个方面，阐明水力设计原则，介绍一些工程实例和科研成果，并对高水头泄水建筑物水力设计的发展趋势进行讨论。不涉及详细的机理和理论计算。

本书在编写过程中，承蒙清华大学余常昭教授和天津大学刘宣烈教授提出宝贵意见。谨此致谢。

限于水平，错误之处，在所难免，恳切希望读者批评指正。

作 者

1988年12月

目 录

前 言

第一章 高水头泄水建筑物的空蚀及其防止措施	1
1-1 概述	1
1-2 溢流曲线	3
1-3 门槽的水流特性及体形选择	6
1-4 反弧体形	9
1-5 消力墩的体形	11
1-6 泄水孔洞进水口的体形	13
1-7 有压泄水孔洞的出口体形及下游明槽	22
1-8 高水头泄水建筑物的表面不平整度	28
1-9 掺气减蚀措施	33
1-10 泄水隧洞及坝身泄水孔的通气孔	40
1-11 有压泄水孔洞和无压泄水孔洞的比较	45
第二章 高水头泄水建筑物的磨损及抗磨材料	48
2-1 概述	48
2-2 磨损与空蚀的关系	49
2-3 混凝土磨损深度的估算	50
2-4 抗磨材料	55
第三章 高水头泄水建筑物的消能	59
3-1 高水头泄水建筑物消能方式的比较	59
3-2 挑流消能的新发展	73
3-3 挑流鼻坎高程及起挑流量的校核	81
3-4 库流消能的设计	84
3-5 大单宽流量的底流消能	90
3-6 泄水隧洞的洞内消能措施	92
参考文献	95

第一章 高水头泄水建筑物的空蚀及其防止措施

1-1 概 述

当水流中局部区域的压强由于某种原因降低到一定程度时, 水流内部出现蒸气(或气体)空泡或空穴, 这种现象称为空化。在发生空化以后, 常常引起空化区附近固体边壁的剥蚀破坏, 称为空蚀。空蚀破坏的机理至今还没有研究得很清楚, 多数人认为是一种机械的破坏作用。空化在低压区发生, 但空泡被带到压强较高的区域, 受到周围水体的压缩, 迅速溃灭。空泡的形成及溃灭的过程极短, 仅有几千分之一秒。但空泡溃灭时所产生的压力却很大, 其值可高达几千个大气压^①。如果溃灭过程发生在固体边壁附近, 则边壁将受到来自气泡溃灭的巨大冲击作用(见图 1-1)。这种作用反复发生将导致材料断裂或疲劳破坏而剥蚀。

为防止空蚀, 最好的办法是避免发生空化。因此, 研究发生空化的条件很重要。一般认为, 当水流某点绝对压强降低到当时温度下的蒸气压强 p_v 时, 就发生空穴。而未受边界局部变化扰动的水流某点绝对压强与 p_v 接近的程度, 即反映该点水流发生空化可能性的大小。

常用空穴数 σ 作为衡量空穴是否会发生或空穴过程发展程度的指标。其形式为

$$\sigma = \frac{p_a + p_v - p_v}{\frac{1}{2} \rho u^2} = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (1-1)$$

式中 p_a 及 u_a ——分别为水流未受边界局部变化扰动的相对压强及流速, 一般可取断面平均值;

p_a ——大气压强;

p_v ——蒸气压强;

p ——绝对压强。

实际上, 空穴数 σ 就是表示水流未受扰动时绝对压强与蒸气压强接近程度的一个系数。故水流某点的空穴数 σ 愈小, 发生空化的可能性愈大。对于某一边界局部变化处, 当

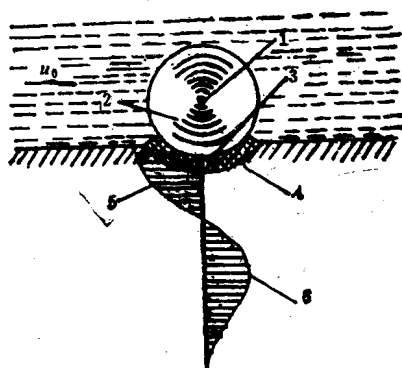


图 1-1 未触及固体边界的空泡溃灭时冲击波示意图

1—溃灭的空泡; 2—冲击波波前; 3—边缘略微隆起的凹坑; 4—塑性变形区; 5—引起压缩的冲击波; 6—引起拉伸的冲击波

① 1 个大气压约等于 0.1 MPa。

σ 小到某一数值即开始发生空化。这个数值称为初生空穴数 σ_i (也有人采用空化已充分发展的空穴数作为设计的判别标准, 称为临界空穴数 σ_c)。边界条件不同, 流速分布和压力分布的情况也不同。故初生空穴数的大小随边界条件而异。某一边界条件的 σ_i 可由试验求得。初生空穴数 σ_i 较大, 即表明该边界条件可能引起压降较大, 因而出现空化的可能性也较大。实际上, σ_i 就是表示边界局部变化可能引起的压降系数。通过未受扰动水流的空穴数 σ 与该边界条件初生空穴数 σ_i 的对比, 即可确定发生空化的可能性。如 $\sigma \leq \sigma_i$, 则有可能发生空化。反之, 不会发生空化。因此, 在设计泄水建筑物时, 为避免发生空蚀破坏, 除在布置上 (例如改变洞线高程或断面尺寸等) 设法避免压强过低和流速过高以提高实际水流的空穴数外, 更重要的是改善建筑物的体形, 包括壁面的不平整度以及糙率等, 以降低初生空穴数。

泄水建筑物的过水边界, 如设计不当, 泄流时往往产生旋涡。空穴常最早并最强烈地发生在旋涡的低压区。因此, 过水的边界形状, 首先要满足不发生边界层分离的条件。因为在分离水流中有较高程度的紊动旋涡。而边界分离的必要条件是沿程压力变化梯度 $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$, 故只要过水边界形状能做到不使边壁水流的流速急剧减小、动能较主流区大大降

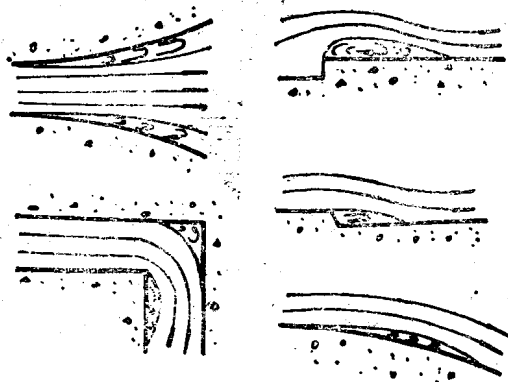


图 1-2 各种水流分离情况示意图

低, 保持边壁 $\frac{\partial p}{\partial x} \leq 0$, 即不发生边界层分离现象。故应尽量使过水边界体形没有急剧扩散、转弯、曲率过大以及局部表面不平整体或突体等 (见图 1-2)。

边界切应力过大往往是造成空蚀破坏的原因之一。当边壁切应力很大时, 即使边壁几何形状有微小的变化或局部表面稍有不平整, 都足以引起水流剧烈扰动, 产生旋涡, 造成局部压力降低, 出现空蚀。

根据边界层的动量积分方程式, 边壁切应力的关系式可写为

$$\tau_0 = \rho u_0^2 \frac{\partial \delta_2}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} (2\delta_2 + \delta_1) \quad (1-2)$$

式中 δ_1 及 δ_2 ——分别为边界层的位移厚度及动量损失厚度。

由式 (1-2) 可见, 边壁切应力的大小与势流速度、边界层厚度以及沿程压力变化梯度有关。反弧末端与泻槽衔接处容易发生空蚀, 可能是与该处边界切应力过大有关。

阿恩特 (E.A.Arndt) 和伊本 (A.E.Ippen) 在研究粗糙表面对空化初生影响的试验中得出结论 (1968年), 初生空穴数 σ_i 与壁面切应力有关, 其关系式为

$$\sigma_i \approx 16C_f \quad (1-3)$$

式中 C_f ——表面摩阻系数, 定义为 $C_f = \tau_0 / \frac{\rho u_0^2}{2}$ 。

可见切应力大小直接影响初生空穴数的大小。对于完全粗糙表面的流动来说, 当粗糙的型式和分布状况为一定时, 粗糙高度 k_s 就是影响流速分布和摩阻系数 C_f 的唯一因素。因

此, 提高壁面光滑度也是减少发生空蚀的措施之一。

总之, 在设计和建造高水头泄水建筑物时, 应尽量改善建筑物体形, 控制壁面不平整度。使过水边界的曲率连续渐变, 并保持壁面比较光滑。

南京水利科学研究院柴恭纯曾任意抽取200多个国内外泄水建筑物发生空蚀事故的实例, 根据其特征进行统计分析。其中由于过水边界体形不适(包括溢流堰顶、反弧段、孔洞进水口、门槽、消能工等)以及壁面不平整等原因造成的空蚀破坏, 约占75%; 由于其他原因, 如明满流过渡、双层过水、进口旋涡以及通气不足等而造成空蚀破坏的, 约占25%。当然, 后者往往又与建筑物的体形有一定联系。因此, 在防止空蚀的工程措施中, 改善建筑物体形和控制表面不平整度占有重要地位。近年来, 除在体形和不平整度(包括壁面的孤立突体和均布糙率)方面进行防蚀研究外, 有不少人还对近壁层掺气减蚀的措施作了大量研究。这些措施已在很多工程中得到应用。本章将对上述几种防蚀措施作较详细的介绍。在封闭管道中设置通气孔, 除具有防蚀的目的外, 还有其他方面的用途, 将在本章中一并加以论述。

关于利用超空穴防止空蚀问题, 也是目前研究的课题之一。其基本思想就是将水流分离(扩散)段加长, 以使空泡溃灭区向水流内部转移, 远离壁面从而使边壁免于空蚀。有人研究超空穴消力墩问题, 以解决消力墩消能作用与发生空蚀的矛盾。但这方面的资料目前还较少, 不拟详述。

利用抗蚀材料作为泄水建筑物的护面, 也是防止空蚀的措施之一。抗空蚀和抗磨损对材料的要求, 有所相同, 也有所不同。而抗磨损相对于抗空蚀来说对材料有更多的依赖。因此, 抗空蚀材料问题将在第二章中与抗磨损材料一并介绍。本章不再赘述。

1-2 溢流曲线

长期以来, 水利科技工作者对溢流曲线(包括自由溢流及带胸墙的孔流)进行了大量的研究。仅根据有限的文献资料, 国内外提出的自由溢流曲线不下10余种。研究的目的不外乎下面两个问题: 一是设法避免溢流面由于体形不适而发生空蚀破坏, 二是设法改善溢流面体形而提高流量系数。前者属安全问题, 后者涉及建筑物的经济效益。现仅就溢流面空蚀问题作一简单介绍。我国70年代结合修订《重力坝设计规范》, 曾在这方面作了不少调查研究工作。根据对29个国内外工程的调查, 除发现柘溪水电站溢流坝(带胸墙的)因门槽内立轴旋涡引起坝顶附近溢流面的轻微空蚀破坏外, 其余基本上未发现空蚀。据作者所知, 国外溢流坝因坝面曲线不适合而造成空蚀破坏的例子也是极个别的。由此可见, 溢流坝面由于曲线形状而引起的空蚀问题并不是想象的那样严重。目前各国对坝面允许负压值的规定各不相同, 我国规定负压值不得超过3~6m水柱(校核洪水位闸门全开时)。

目前常用的溢流曲线, 主要有克-奥型和WES型。由于历史原因, 60年代以前我国水利界曾广泛应用克-奥型, 但其流量系数以及压力特性均不如WES型。故近年来WES型在中高溢流坝中逐渐得到推广应用。溢流曲线应包括顶点上游曲线和下游曲线两部分。下游曲线, 过去研究得已很多, 大体上已经定型, 上游面为垂直的溢流坝, WES型下游曲线

的表达式为

$$\frac{y}{H_d} = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{H_d} \right)^{1.85} \quad (1-4)$$

式中 H_d ——坝剖面设计水头。

座标原点在坝顶最高点。这方面资料在水力学及水工建筑物教材中均有详细介绍，本书从略。坝顶上游曲线，迄今研究得还不够充分，但该处为负压的敏感区，故应予足够的重视。

WES的上游曲线最早（1944年）采用二圆弧型式（图1-3）。但运用经验表明，第二圆弧与垂直坝面相交，曲率不连续。容易造成水流分离、压力降低，特别是溢流水头较大时，有可能产生空蚀等不利影响。

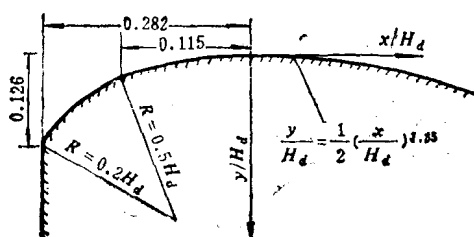


图 1-3 圆弧坝顶曲线

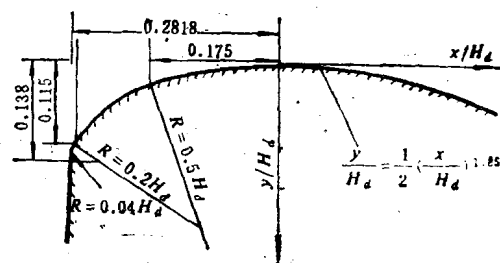


图 1-4 三圆弧坝顶曲线

1961年，葡萄牙国家土木工程试验室提出三圆弧复合曲线。在二圆弧基础上增加一个半径为 $R = 0.04H_d$ 的第三个圆弧，使曲线与上游垂直面相切（图1-4）。这种型式的曲线与二圆弧曲线相比，流量系数差别不大，但压力情况有所改善。WES通过试验证实这一结论，并于1970年修订《水力设计准则》时，正式推荐三圆弧曲线为坝顶上游曲线。

克-奥剖面的坝顶上游曲线只有三个座标点。该处曲率变化较大，故曲线型式很难控制。南京水利科学研究院曾用样条函数对其座标点进行加密。加密后，坝顶上游虽为一光滑曲线，但端点斜率只能大于或等于 -1.5 ，与上游垂直坝面相交而不相切。故与上述二圆弧曲线具有相同的缺点。

近年来，我国有不少单位对坝顶上游曲线开展了科学研究，认为上述几种曲线都不够理想。南京水利科学研究院利用有限单元法，在二元理想势流条件下，通过大量计算，对已有的几种型式的坝顶曲线进行了研究。经过比较分析，认为椭圆曲线是一种较好的坝头型式。椭圆曲线的方程表示为

$$\frac{x^2}{(aH_d)^2} + \frac{(bH_d - y)^2}{(bH_d)^2} = 1 \quad (1-5)$$

式中 H_d ——定型设计水头；

aH_d ——半长轴；

bH_d ——半短轴（图1-5）。

椭圆曲线除具有与上游垂直坝面相切、曲率连续变化、负压可以减小的优点外，还可选择不同的 a 和 a/b 值以调整端点、顶点及沿程的曲率半径，以适应具体的水流条件。在超

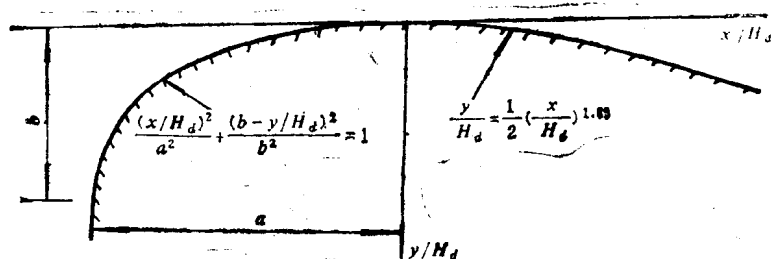


图 1-5 椭圆坝顶曲线

水头的情况下 ($H/H_d > 1$)，对于一定的长轴 a ，改变长短轴比例 a/b 时，坝头压力改变很大 (图 1-6)。 a/b 值较小时，坝头最低压力产生在坝顶原点附近。而 a/b 值较大时，则最低压力区域靠近曲线的上游端。对每一个半长轴 a 值，总有一合适的 a/b 值，使坝顶负压最小，同时坝头压力分布比较均匀。以 $H/H_d = 1.33$ 的资料求得最优比值的经验关系式为

$$\frac{a}{b} = 0.87 + 3a \quad (1-6)$$

为保证在设计水位时具有较大的泄流能力， a 值以选用 0.28~0.30 为宜。

我国水利电力部《混凝土重力坝设计规范》SDJ21-78 已推荐采用上述椭圆曲线为坝顶原点上游曲线。由于采用椭圆曲线减少了坝头负压，故在允许坝面产生相同的负压条件下，可以采用较小的设计水头，从而可以获得较为经济的溢流坝剖面。

带胸墙的溢流坝或溢洪道，目前国内大工程中采用的只有少数几座 (表 1-1)，故运用经验尚不很多。由表可见，这几个工程的溢流曲线基本上可分为两种类型。一种是按平抛运动导出的二次抛物线，如丰满、参窝等工程。即是目前我国重力坝设计规范所建议的理论曲线：

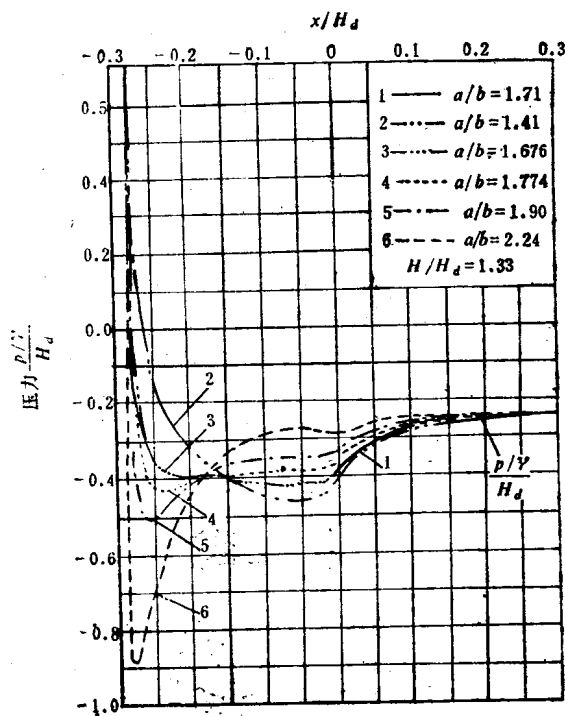


图 1-6 椭圆 $a=0.28$ 时坝头压力

$$y = \frac{x^2}{4\varphi^2 H_d} \quad (1-7)$$

式中 H_d ——定型设计水头；

φ ——孔口收缩断面上的流速系数。

另一种是以柘溪为代表的非整次幂曲线，其形式为

$$y = x^{1.7} / H_d \quad (1-8)$$

表 1-1

带胸墙溢流坝实例

编 号	工 程 名 称	坝 面 曲 线	
		坝 顶 上 游	坝 顶 下 游
1	丰 满	圆弧 $R=24\text{m}$	$y=0.0842x^4$
2	参 窝	1:3直线	$y=0.0163x^2$
3	柘 溪	$\frac{x^2}{5^2} + \frac{y^2}{3^2} = 1$	$y=0.0549x^{1.17}$
4	刘 家 峡	圆弧 $R=6.6\text{m}$	$y=0.05x^{1.17}$
5	黄 龙 滩	$\frac{x^2}{5.5^2} + \frac{y^2}{2^2} = 1$	$y=0.017x^{1.0}$
6	龚 嘴*	上游倒悬	$y=0.25x+0.0212x^4$
7	上 犹 江	圆弧 $R=7.72\text{m}$	$y=0.020519x^4$

△ 原设计为 $y=0.0492x^{1.17}$ ，表中为实际采用曲线的上半部。

* 闸门全开时，只发生堰流。

各工程的定型设计水头取值很不一致。根据推算，丰满溢流坝 $H_d=8\text{m}$ ，相当于校核情况下闸门全开时孔口中心线以上水头的72.7%。刘家峡溢洪道 $H_d=20\text{m}$ ，正好等于堰顶以上设计水头。柘溪溢流坝面曲线是以堰顶水头为19.88m、闸门开启1m时的实测水舌下缘轨迹线为设计依据。按闸门孔口中心线计算，其定型设计水头 $H_d=19.38\text{m}$ ，标准较高。究竟采用多大的水头作为定型设计水头才能做到既不发生空蚀破坏又能提高流量系数，还是值得进一步研究的问题。上述重力坝设计规范规定，定型设计水头可取孔口中心线至校核洪水位的水头的75~95%； ϕ 值一般取0.96若孔前设有检修闸门槽时，取 $\phi=0.95$ 。

1-3 门槽的水流特性及体形选择

在国内外水利工程中，门槽由于设计不当而发生空蚀破坏者不乏实例。美国的庞那维尔(Bonneville)坝溢洪道闸门，工作水头为15m。采用矩形方角门槽，宽深比为3.19，过闸水流受门槽体形及坝顶曲率综合影响，压力降低，水流空化数较小，1939~1945年经三次空蚀和修复，最后用25mm钢板镶护，才未再破坏。我国刘家峡水电站左岸泄水道闸门采用矩形缺角门槽，宽深比为1.33，泄流时最高水头为57m，相应孔口流速为28m/s。闸门定轮主轨发生空蚀，长6m，宽0.19m，最深1.5cm。柘溪水电站6号发电引水洞，施工期间曾担负导流任务。进口平面闸门矩形门槽宽1.40m，深0.7m。1962年4月，闸门下降时突然卡在底坎以上2.5m处，造成局部开启泄流，历时239d(天)。闸门最大工作水头27.71m，闸下流速达24m/s。1963年关门检查，发现紧接门槽下游两侧洞壁上有空蚀破坏。坑深达23cm，门槽角钢与混凝土面脱离(图1-7)。可见，门槽体形设计不当或未考虑意外的运用情况，均有可能造成空蚀破坏。

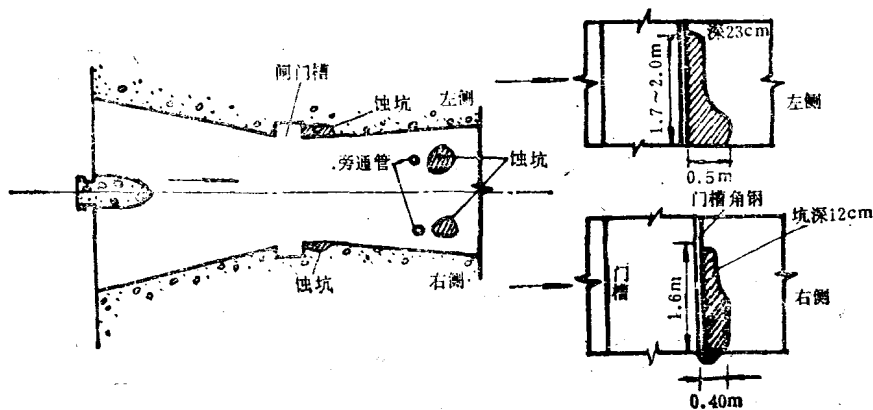


图 1-7 柘溪水电站 6 号发电引水管施工期过水空蚀情况

近年来,不少水利工作者对这一问题开始注意,研究门槽的水力特性及防蚀措施。水利水电科学研究院金泰来等对门槽空化问题作了较为全面和深入的研究^[1]。他们的研究表明,常见的门槽水流空化形态有分离型空化和旋涡型空化两类。在分离型空化中可见到非球形的空腔或单个球形空泡或空穴云。空蚀破坏多发生在门槽下游边界。在旋涡型空化中,一般在门槽内出现漏斗型立轴旋涡。当旋涡中心的压力低于汽化压力时,将发生旋涡型空化。空蚀破坏多发生在门槽内。有时门槽下游边界上亦伴随发生分离型空化。分离型空化多发生于宽深比较大($W/D > 2.5$)的矩形方角门槽,上述庞那维尔以及柘溪两个空蚀破坏实例,均属此类。而旋涡型空化多发生于宽深比很小($W/D < 1.4$)的矩形方角门槽。上述刘家峡门槽主轨空蚀,可能属此类型。

影响门槽的初生空化数的因素很多,包括水流特性和体形特征两个方面。国内外工程实践及科研成果表明,在体形方面,门槽宽深比 W/D 及错距比 Δ/W 是决定门槽空化的主要因素,其次是斜坡坡度 Δ/X 及圆角比 R/D (图1-8)。水利水电科学研究院的试验研究得出门槽的初生空化数与宽深比的经验公式。

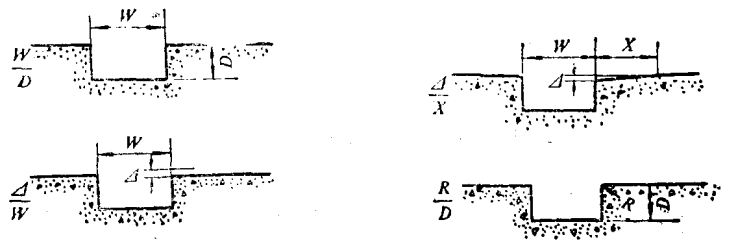


图 1-8 门槽体形的几何参数

(1) 在弱旋涡区,分离型空穴的初生空化数大于旋涡型空穴的初生空化数,分离型空化起主导作用。此时

$$\sigma_i = 0.38(W/D) \quad (1-9)$$

适用范围为 $W/D = 1.5 \sim 3.5$ 。

(2) 在强旋涡区, 旋涡型空穴的初生空化数大于分离型空穴的初生空化数, 旋涡型空穴起主导作用。此时

$$\sigma_i = 0.28(W/D)^{1.2} \quad (1-10)$$

适用范围为 $W/D = 0.75 \sim 1.5$ 。

根据工程中紧靠门槽上游处的水流空化数 σ 值来选用适当的门槽型式, 使 $\sigma_i < \sigma$, 即不致发生空化, 因而可以避免或减少空蚀。

我国水利水电科学研究院还整理了华德(T.M.Ward)的研究资料, 如图1-9。由该图可见, 在 $W/D < 0.63$ 及 $W/D > 1.27$ 两个区域内, 凹槽下游边缘出现分离型空化。当 $W/D = 0.63$ 及 1.27 时, 空穴伸进槽内, 呈 $3\frac{1}{2}$ 周的周期性旋涡型空化。而当 $0.63 < W/D < 1.27$ 时, 凹槽内出现旋涡型空化。图1-9内还示出相应于上述三种情况的I、II、III型的槽内流线轨迹的侧视及顶视。该图上方所示为将门槽作为不平整度的一种特例, 以该院的试验资料来解释各种门槽宽深比可能出现的流态及空化类型示意图。为避开旋涡型空化区, 并谋求较小的分离型空化的初生空化数, 建议对矩形方角门槽, 其宽深比最好选用 $W/D = 1.6 \sim 1.8$ 。若布置上有困难时, 可放宽到 $1.4 \sim 2.5$ 。

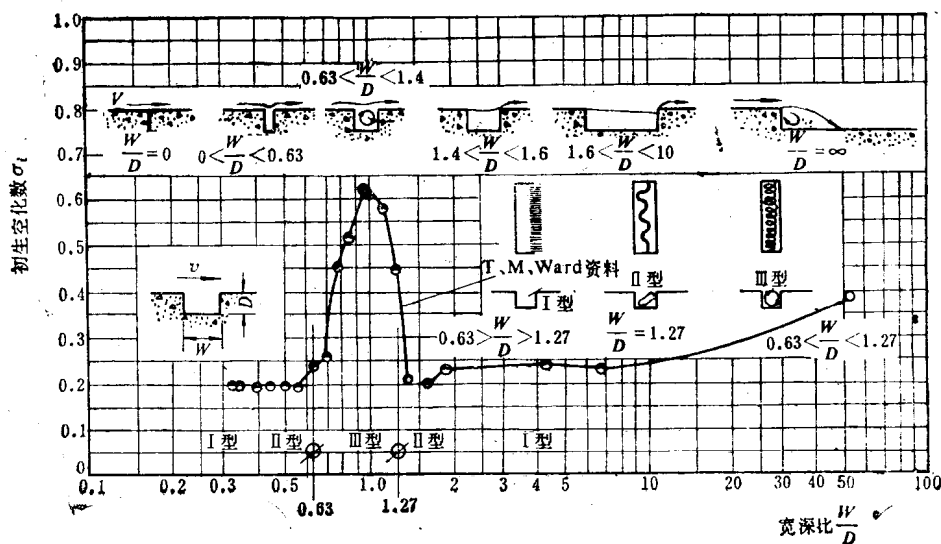


图 1-9 凹槽宽深比和初生空化数及空化型态的关系

错距比 Δ/W 是影响门槽空蚀的另一个主要因素。试验表明, 门槽下游边壁后退所形成的错距, 可改善门槽水流的空化特性, 对减小初生空化数起显著作用。当水流空化数较小, 只靠选择门槽宽深比无法满足设计要求时, 可利用错距以减小初生空化数。在实际工程中, 为了有利于门槽内滑道或滚轮轨道及埋件的布置, 错距宜尽量小些。对于 $W/D = 1.0 \sim 3.0$ 的门槽, 一般可采用 $\Delta/W = 0.05 \sim 0.08$ 。但如再小于 0.05 , 则初生空化数增长很快, 错距的效果将不明显。

当门槽边墙采用错距时, 可用斜坡将门槽下游角隅与下游边墙衔接, 其初生空化数的

经验公式为

$$\sigma_i = \left(\frac{4}{X}\right)^{-0.7} \quad (1-11)$$

显然,斜坡愈缓,初生空化数愈小。但当斜坡坡度 $4/X$ 值小到一定数值时,斜坡的初生空化在各种影响因素中已不起主要作用。用钢板衬砌的大型工程泄水道的门槽斜坡坡度可采用 $1/8 \sim 1/12$,其相应的 σ_i 值已都小于0.25。除特殊情况外,一般不必将斜坡放得过缓,以免斜坡段过长而用钢材过多。

门槽下游角隅采用圆弧或椭圆曲线,都能使初生空化数 σ_i 降低。试验表明,当圆角比 $R/D \geq 0.1$ 时,其效果较为显著。矩形宽门槽要求较大的圆角比,有错距与斜坡的门槽可选用较小的圆角比。实际上,圆角或椭圆角对降低初生空化数的作用不如错距大。一般不宜靠加大 R 来达到降低 σ_i 的目的。多数情况下采用小圆角辅助错距来降低门槽初生空化数。根据施工条件,可用 $R = 3 \sim 5 \text{ cm}$ (将埋件加工成小圆角)或用 $R = 15 \sim 20 \text{ cm}$ (用钢板卷压成型)。

无论是明流或有压孔洞,一般工作闸门下游多为明流。门槽处流速大,压力小,故容易发生空穴和空蚀破坏。因此,在条件许可时,宜尽量采用没有门槽的弧形闸门。事故检修门一般设置在工作门上游,采用平面闸门,其门槽可按工作门槽设计。但一般检修门处或由于过水断面较大而流速较小,或由于出口收缩形成的反压,发生空蚀的可能较小。

1-4 反弧体形

无论是溢流坝、泻槽溢洪道或龙抬头式泄洪隧洞,都是用反弧把陡坡与下游联结起来。已往的泄水工程大多用单圆弧曲线。为使水流平顺并避免空蚀破坏,常规定反弧半径 R 为反弧最低点水深 h 的某一倍数。实际工程中采用数值相差很大。例如国内的丰满溢流坝的 $R/h = 23$,而双牌溢流坝的 $R/h = 3.25$,相差值达7倍之多。目前一般按 $R/h = 4 \sim 10$ 进行设计。也有人根据已建工程的统计分析,取反弧半径 R 为最高库水位与反弧最低点高差 Z 的某一比例: $R = (0.3 \sim 0.7)Z$ 。如 Z 为一定,反弧上水深小时 R 取小值。上述这些规定都比较简单,便于设计时应用,但也相当粗略。实际上反弧半径 R 除应与 h 有关外,同时还应与反弧处平均流速 v 以及下游衔接形式有关。郭子中建议采用的经验公式为

$$R = 0.305 \times 10^4 \quad (\text{m}) \quad (1-12)$$

其中

$$x = \frac{3.28v + 21H + 16}{11.8H + 64}$$

式中 H ——堰上水头,以m计;

v 以m/s计。

尽管式(1-12)量纲不一致,但作为经验公式,它所考虑的因素较前二者还全面一些,有一定实用价值。在初步设计阶段,可作为选择反弧半径 R 值的参考。

近年来,由于国内外不少泄水工程在反弧部分发生空蚀破坏,很多学者对反弧体形进行研究。认为在工作水头大于100m即流速约在35m/s以上情况下,不宜简单地按照上述

一些经验公式设计反弧。

高坝泄洪时, 水流向下逐渐加速, 同时坝面压力逐渐下降。到了圆弧起点上游不远处, 由于离心力关系, 压力开始上升。在圆弧内达到最大值, 然后又逐渐下降 (图1-10)。水流空穴数最小值将出现于圆弧起点附近。如果这一最小值足以引起空化, 则以后在圆弧内压力和空穴数的回升, 正是造成空蚀破坏的条件。从减免空蚀的观点来看, 由于空化数先小后大, 大小悬殊, 圆弧作为高坝溢洪道的反弧是不利的。理想的情况应该是维持空穴数沿程均等, 并利用离心力提高沿程的最小空穴数。因此出现了采用等空穴数曲线的想法。曲线的起点可以较高。随着流速的增加, 离心力也逐渐加大, 故可维持空穴数沿程均等。关于等空穴数曲线方程的近似计算公式及相应的计算程序, 读者可参阅文献[2]。一般地说, 等空穴数剖面在大单宽流量条件下作用较好。因为单宽流量愈大, 等空穴数曲线的起点愈高, 因而空穴数愈小。在这种情况下, 相当长的一段坝面都是等空穴数曲线, 而不是直线坝坡。西班牙的阿尔德亚达维拉 (Aldeadavila) 重力拱坝, 为选定溢洪道的反弧形式, 曾进行几百组试验, 是一个经过特殊研究而运转良好的实例。该坝溢洪道剖面 (图1-11) 与我国水利水电科学研究院计算的等空穴数曲线基本重合。计算表明, 单宽流量较大 ($q=80\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$), 坝面较陡 ($m=0.466$) 时, 应用等空穴曲线有可能使一个落差为111.5m的高水头溢洪道具有相当于落差仅为62m的泄洪空穴数, 从而大大提高了建筑物的安全程度。

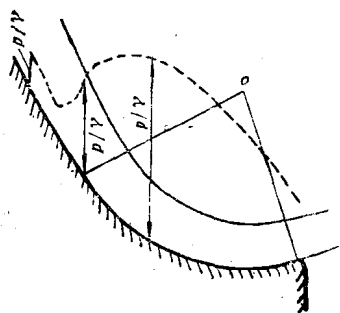


图 1-10 反弧压力分布示意

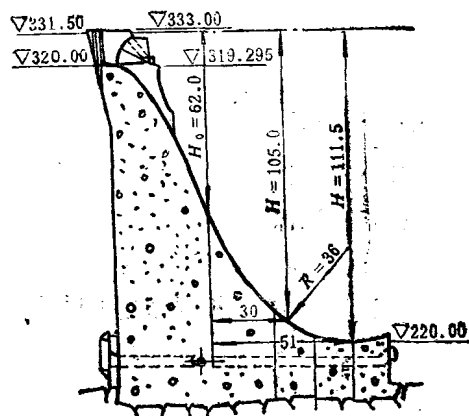


图 1-11 阿尔德亚达维拉坝溢洪道 (单位: m)

等空穴数曲线只适用于末端具有挑坎的反弧。当反弧末端与泻槽或水平段连接时, 离心力突然消失, 最低空穴数发生在反弧末端, 故无法利用上述基本概念作出等空穴数曲线。

不少工程实践表明, 当反弧末端与泻槽或水平段衔接时, 空蚀破坏发生在反弧末端。如美国的波尔德 (Boulder, 即胡佛 Hoover) 坝、黄尾 (Yellow Tail) 坝的泄洪洞以及我国的丰满溢流坝, 刘家峡的泄洪洞等, 都是如此。对反弧末端容易发生空蚀破坏的原因, 各家之说不一。有人认为是由于反弧末端曲率不连续引起脱离而产生负压; 有人认为是由于局部压力脉动造成的瞬时压力降落过大; 也有人认为是由于边界层发展特点带来的

反弧末端边界切应力加大。清华大学结合小浪底龙抬头泄洪隧洞试验进行了大量研究[3]，发现在壁面非常平整时，反弧末端并无负压出现。从理论上分析，该处由于离心力突然消失，沿程压力变化梯度为负值（ $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ ），也不具备边界层脱离的条件。因而不应归因于总体体形（不包括局部不平整度）引起脱离而产生局部负压。试验观测还表明，该处压力脉动也不大，仅为流速水头的2.6%。看来压力脉动也不是空蚀破坏的主要原因。从测得的沿程各断面的流速分布规律来看，反弧末端的边界层厚度最小，层内流速变化梯度最大，因此边界切应力也增大。根据边界层动量积分方程，也可以得出同样结论。这在本章概述中已经提到。在边界切应力较大情况下，边壁表面稍有不平整，都会给水流带来剧烈的扰动，造成局部绕流速度和压力降落都很大。因此产生空化的可能性也很大。由于反弧体形影响着边界层的发展特点，从这个意义上讲，空化也与反弧体形有关。

基于以上考虑，他们建议采用图1-12所示的体形，反弧段由两个三次曲线组成，或由两个三次曲线、中间加一圆弧组成。按该图上所示座标系统，曲线表达式分别为

$$y = Kx^3 \quad (1-13)$$

$$y = K(x^*)^3 \quad (1-14)$$

只要选取合适的系数 K ，就可使曲线曲率从零开始逐步增大到某一定值。 K 可按反弧长度和上下游连接段坡度要求通过试算求出。这样求得的曲线能保证反弧段与其上下游连接为连续渐变。用有限元法进行的势流计算表明，这种反弧体形沿程压力变化梯度大为减小。由动量原理算得的反弧末端的切应力也显著地减小，而且沿程切应力分布也趋于均匀。这种反弧体形当然不如单圆弧施工放线方便，但在防蚀方面确有一定优越性。设计高水头泄水建筑物时可考虑采用。

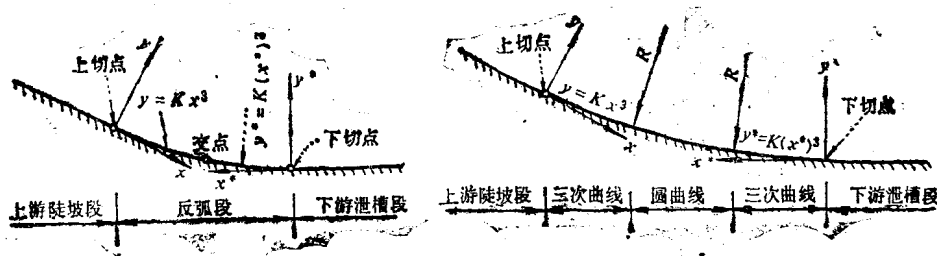


图 1-12 反弧段三次曲线

还有人提出反弧体形采用椭圆、抛物线或悬链线等。对改善水流条件、提高水流空穴数都有一定帮助。这里不一一赘述，读者可参阅有关资料。

1-5 消力墩的体形

在水利工程中常采用水跃消能。为防止远驱水跃的产生，除降低护坦高程外，有时在消力池内设置消力槛、消力墩等消能工以形成“强迫水跃”。为使消力墩充分发挥作用，

一般均把消力墩布置在水跃前部。但当布置在跃首时,消力墩以及消力墩下游附近的护坦易受高速水流的空蚀破坏。只有在流速小于 $12\sim 14\text{m/s}$ 时,消力墩上才不致发生空蚀。

我国盐锅峡水电站溢流坝消力墩的空蚀是一个典型的实例。该坝最大高度 52m 。为提高消能效果,在水跃前收缩断面处设置一排消力墩。墩高 3m ,宽 3m ,间距 3m 。经 230d 运行,发现所有消力墩的两侧均受到不同程度的空蚀。最大蚀深 120cm ,最大剥蚀体积占消力墩体积的 20.7% 。消力墩迎水面和抹角部分的衬砌钢板大部分被冲掉。苏联新西伯利亚水电站溢流坝消能工的空蚀破坏也很典型。该坝的设计水头 23.5m ,收缩断面处的单宽流量 $47\text{m}^3/\text{s}$ 。过水以后检查发现,每个消力墩侧面均有破坏。空蚀深度一般为 $40\sim 60\text{cm}$,最大深度为 $70\sim 80\text{cm}$ 。此外,还有不少实例都表明,尽管水头并不很高,流速也不很大,但如消力墩的型式或布置设计不当,仍有可能遭受空蚀破坏。

改变消力墩体形,使其流线化,或使棱角圆化,借以提高初生空化数,是设计者为减轻墩体及其附近护坦空蚀需首先考虑的问题。例如,图1-13中I型消力墩的初生空化数 $\sigma_i=1.45$;II型将墩体侧面做成扩散形, σ_i 值降为 1.2 ;III型再将墩角圆化, σ_i 值降至 0.95 。由此可见改变体形的效果。

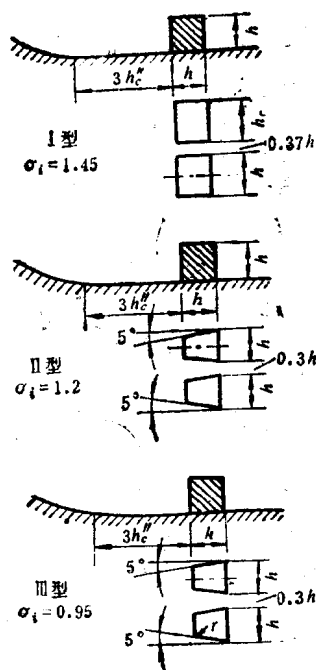


图 1-13 消力墩体形对 σ_i 值的影响

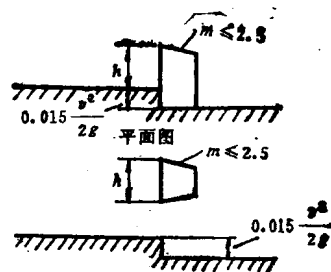


图 1-14 超空穴消能工

多年来不少水利科学工作者从事消力墩的研究工作,并对消力墩的体形提出不少方案。这些方案或多或少可以减少墩体及其附近护坦上的负压,有利于防止空蚀。然而,墩体流线化与消能效果是有一定矛盾的。体形愈流线化,消能效果愈受影响。有时流速很高,单纯靠体形的选择防止空蚀几乎是不可能。因此,有人建议采用超空穴结构。所谓超空穴结构,就是结构体形能使射流与固体边界发生分离,让空穴充分发展,使空泡在远离结构表面的水流中溃灭,以保证建筑物表面不受空蚀破坏。图1-14所示即为超空穴消力墩。从它的边棱分离的空蚀云离开固体边界。如果空蚀云不贴附在固体边界上,则这种消能工将不产生空蚀。但是,必须指出,这种消能工只有经过试验研究才能选用。目前尚属研究阶段,在工程上实际应用尚不多见。