

文章编号: 1001-5485(2000)05-0001-04

弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀研究进展综述

肖兴斌,王才欢,王业红

(长江科学院 水工研究所,湖北 武汉 430010)

摘要: 偏心铰弧形闸门门座结构特殊,所处水流情况复杂,实际运行中大多数是成功的,但也有少数发生空蚀破坏。应找出发生空蚀破坏的原因,并提出改善措施,使工程应用建立在可靠的基础上。

关键词: 突扩跌坎;水力特性;掺气减蚀;最佳体型

中图分类号: TV131.3 文献标识码: B

国外自 50 年代开始,陆续使用偏心铰弧形工作闸门。国内在 70 年代对此开始研究,目前已有 20 多个国家在 100 多工程上应用了掺气减蚀设施,如前苏联的萨扬·舒申斯克、布拉茨克,美国的大苦里

格伦峡,巴西的福兹杜阿里亚、伊太普等工程。

在高压弧形闸门方面,采用突扩跌坎式通气减蚀的有美国的德沃歇克、巴基斯坦的塔贝拉、日本的二濑等工程,详见表 1

表 1 弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀工程实例

Table 1 Several engineering illustrations on aerators for taintor gates with sudden lateral enlargement and bottom drop

工程名称及国名	设计流量 /m ³ ·s ⁻¹	水头 /m	泄水建筑物 名称	孔口尺寸 m×m	掺气减蚀 设施	运行情况	建成 年份
1. 克拉斯诺雅尔斯克 (前苏联)	165	70	坝身 8 个 泄水孔	5×5	突扩 0.5 m, 跌坎 7 m	1967 年投入运行, 发生空蚀	1964
2. 努列克(前苏联)	-	110	第三层导流 隧洞	5×6	突扩 0.5 m, 跌坎 0.6 m	流速达 40~45 m/s	1972
3. 托克拉古尔斯克(前 苏联)	-	112.5	坝内泄水孔	5×6	弧门突扩	已运行	-
4. 德沃歇克(美国)	1130	81.0	坝身 3 个 泄水孔	2.75×3.8	突扩 0.42 m, 跌坎 0.15 m	3 个孔均发生空蚀	1972
5. 塔贝拉(巴基斯坦)	-	136	3 号泄洪洞	4.88×7.0	突扩 0.35 m,跌坎 0.38 m,坎下有长 16.8 m 平台	发生空蚀	1972
6. 二濑(日本)	400	69	深孔	5×5.6	突扩 0.19 m, 跌坎 0.25 m	-	1959
7. 大渡	-	60	-	5×5.6	突扩 0.2 m, 跌坎 0.17 m	-	-
8. 赫尔耶斯(瑞典)	185	-	泄水孔	2.5×3.0	突扩 1.0 m, 跌坎 0.4 m	已运行	-
9. 结雅(前苏联)	198	83	泄水孔	5×5	突扩 1.5 m, 跌坎 6.5 m	已运行	-
10. 东江(中国)	1625	100	二级放空洞	6.4×7.6	突扩 0.4 m,跌坎 0.8 m,两侧加折流器, 跌坎上加小挑坎 高 0.2 m	-	在建
11. 龙羊峡(中国)	1500	120	底孔	5×7	突扩 0.6 m, 跌坎 2.0 m	已运行,发生空蚀	-
12. 宝珠寺(中国)	-	84.7	右底孔 (双孔)	4×8	突扩 0.4 m,跌坎 1.0 m;坎上加小挑坎 坝高 0.1 m,坡度 1:5	-	在建
13. 小浪底(中国)	810	130	孔板泄洪洞 (3 个泄洪 洞,每个泄洪 洞设 2 个弧 形门)	4.8×4.8	突扩 0.5 m, 跌坎 1.7 m	-	在建

收稿日期: 1999-10-18

作者简介: 肖兴斌(1927-),男,四川巴中人,长江科学院水工研究所高级工程师,主要从事高速水流水动力学研究。

由表 1 可以看出: 有成功的经验, 也有失败的教训, 可从中分析出发生空蚀的原因, 提出改进优化措施和值得注意的问题, 使掺气减蚀设施发挥应有的作用

1 突扩跌坎水力特性

1.1 水力特性试验^[1]

在不同水头时, 一般可能出现三种水流形态。

1.1.1 第一种水流形态

在高水头下, 水流经过突扩跌坎下泄时, 形成射流, 在两侧突扩的边壁之间和跌坎下方的底部形成空腔, 侧空腔和底空腔相连成为空气通道, 可以达到掺气减蚀的目的。在工程上均选用这种通气设施

1.1.2 第二种水流形态

在较低水头时, 侧空腔较小, 或被水花、水雾、水帘所遮蔽, 基本上不能进入空气或卷入极小量空气, 在跌坎下的底空腔也基本上为回水充填, 或形成横轴漩滚, 类似跌坎面流流态; 因此, 当工作水头较低, 通气设施处于跌坎面流工况时, 掺气功能消失, 坎下游发生空蚀的工程实例已屡见不鲜, 例如黄坛口、盐锅峡、回龙山及龚咀等工程的溢流坝都在面流跌坎处发生空蚀

1.1.3 第三种水流形态

该流态是上述两种流态的过渡流态, 时而为较完整的空腔, 时而为面流流态, 通气不畅, 减蚀效果差。

以上三种水流形态, 对某一具体工程, 根据不同的运行工况, 可能出现一种或几种水流形态, 也可根据要求的条件选择相应的通气设施。不得已时, 可对工作水头提出限制条件, 以保持第一种流态为目标, 找出第一种流态向其他水流形态转变时相应的工作水头, 对应跌坎射流工况的最低工作水头, 即称为临界工作水头 H_k 。

1.2 突扩跌坎射流临界工作水头

朱荣林根据试验研究成果^[1], 提出不同的跌坎高度、明渠底坡、坎顶水深对临界工作水头关系曲线如图 1 所示

2 突扩跌坎体型优化措施

根据工程实践运行, 发生空蚀破坏的主要原因

是突扩跌坎体型不能适应水力条件的要求, 通气不畅及施工质量差, 前两者必须通过试验研究, 找出偏心铰弧门突扩跌坎减蚀的最佳体型。

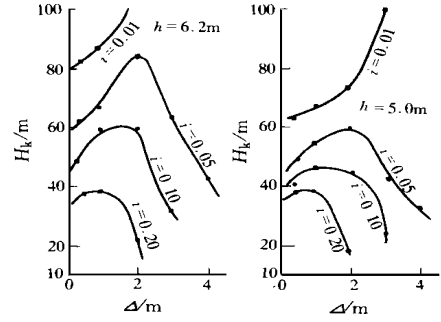


图 1 自由射流工况的临界工作水头

H_k 与坎高 Δ 及坡度 i 的关系

Fig. 1 Relations between critical working head (H_k) and drop height (Δ) under various bottom slopes of open channel and free jet conditions

2.1 坎下游底坡的选择

设计跌坎的目的是使水流脱离底坡面形成空腔, 因此, 要求选择适当的跌坎高度及其下游明渠的坡度与坡长

张韦长等对试验成果整理分析, 提出坎下底坡与有效空腔长度的关系式^①为

$$L_2/R = 1.75Fr^2 \tan T - C,$$

式中: $C = -32.6 \tan T - 0.47$; $Fr^2 = \frac{V^2}{gR}$, Fr 为佛氏数; R 为坎顶的水力半径; L_2 为底腔长度; T 为底坡与水平面的夹角。

当 $\tan T = 15\%$ 时, $C = -5.36$; 当 $\tan T = 10\%$ 时, $C = -3.73$; 当 $\tan T = 5\%$ 时, $C = -2.10$

2.2 偏心铰弧形闸门门座区段体型优化

2.2.1 压力洞出口顶压坡

为了提高洞内的压力, 避免出口前产生较大的负压值, 并抑制水翅强度, 要求压力洞出口顶下压, 下压坡一般以 $1:5 \sim 1:10$ 为宜, 而以 $1:6$ 为好。黄河水利委员会水利科学研究院在小浪底弧门突扩跌坎试验研究中, 证实 $1:8$ 压坡出口流态好, 侧空腔较长, 水翅较低; $1:5$ 压坡出口流态也较好。

2.2.2 两侧突扩宽度

据实例分析: 侧扩比 $\Delta b/b$ (孔宽) 多在 $0.04 \sim 0.1$ 之间, 如侧扩过大, 会造成水翅的加大, 加剧雾化及影响明渠段的流态, 并使近壁区的水流及射角增大, 引起压力降低, 使脉动压强加剧, 易产生空蚀, 如

① 张韦长, 李建中. 高水头底孔偏心铰弧门门座与突扩掺气设施相结合的试验研究. 见: 全国高水头泄水建筑物水力等问题论文集上册. 北京: 中国水利学会水力学专业委员会等, 1987. 7

德沃歇克坝 $\Delta b/b=0.167$, 侧壁发生空蚀

2.2.3 跌坎高度

从实践中总结出: Δ/h (坎顶水深) 多在 0.03~0.1 范围内较好, 如国外的二滩、努列克、赫尔耶斯等工程的跌坎高度均在 0.15~0.6 m 之间。通过近几年大量的比较试验研究, 得出在水头 75~100 m, $Fr=2.5\sim 4.0$ 的条件下, 适当的参数选择关系大致为

$$(1) 1 < \Delta \leq 2.0, (2) 0 < \leq 15\%$$

式中: Δ 为跌坎高度, 单位为 m; i 为底坡

2.2.4 增设小挑坎 (折流器)

在跌坎 (或侧壁) 上增设小挑坎 (折流器), 可使水流向上挑, 对增大空腔长度有利。在中、低水头下效果较显著, 但小挑坎高度选择应适宜, 一般为 0.10~0.20 m。如挑坎太低或坡度太小, 对增加有效空腔长度不明显; 若太高或坡度太大, 可增大空腔长度, 但使下游水面过分抬高, 水翅增强, 流态不好。

三峡工程泄洪深孔弧门突扩跌坎式通气减蚀试验研究中^[2], 坎上加小挑坎高度 0.1 m, 坡度 1:8, 两侧加折流器 (从上而下 0~0.35 m 的斜三角体), 可增大空腔长度, 改善水流流态。

2.2.5 通气孔位置及通气孔尺寸的选择

当水头在 40 m 以下弧门局部开启运用时, 由于弧门把两侧空腔全部封堵, 两侧弧门底缘水流横向扩散形成斜向螺旋形涡流, 水流流态恶化, 同时下射流部分封堵底侧通气孔; 当弧门全开时, 由于底空腔内漩滚部分或全部淹没通气孔影响供气。通气孔的形式及其位置最好通过模型试验选择, 使通气孔在任何水力条件下不受水帘及横向滚漩滚封堵。

通气量计算: 考虑模型缩尺效应的影响, 通气量应根据原型观测资料总结的经验公式, 参照模型试验成果综合考虑确定。突扩跌坎式掺气减蚀的通气量包括底部空腔气量与两侧夹气量两部分。总的进气量为两者之和^[3]。

通气管尺寸计算: 因目前掺气模型律尚未解决, 模型中测出风速还不能作为设计原型通气孔尺寸的依据, 只能根据工程实践经验统计空腔内负压 Δh_a 绝对值小于 5 kPa 或通气管中风速 (原型观测资料) 按 $V_a=60$ m/s 设计, 一般会有满意的结果。通气孔总面积 A 可按式计算

$$A = \frac{Q_a}{h \cdot 2g\Delta h_a (d_a/d)},$$

式中: h 为通气孔风速系数; d 为水体密度; d_a 为空腔内气流密度。

3 弧门突扩跌坎空化特性分析及防护

根据水工模型试验观测, 可绘出突扩跌坎水流流态示意图。由图 2 可见, 突扩 Δb 的加大, 会使水舌与边墙的接触角 Γ 加大, 从而使得过接触点之后, 近壁区的水流反射角也愈变大, 局部流线呈发散状态, 加之冲击点形成高压冲击, 其脉动压强系数可能增大 10 多倍。冲击点后压力急速下降, 压力梯度较大, 会形成冲击点后剪切层空化^①, 如小浪底[#] 3 孔板泄洪洞弧门突扩跌坎水工模型试验中^[5,6], 当水头 80~130 m 时, 实测突扩空腔后冲击点脉动压力均方根值为 39.24 kPa, 压强系数达 9%, 冲击点后压力下降负压达 10 kPa, 该区为清水层^[4,5]。这没有达到掺气减蚀的目的。

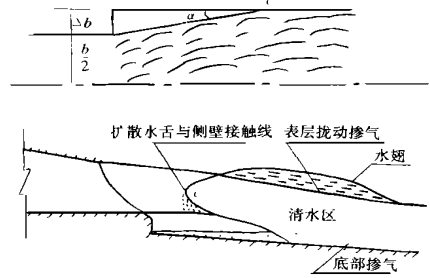


图 2 突扩跌坎水流流态示意图

Fig. 2 Sketch of flow pattern in the region of sudden enlargement and drop

从模型实际观测发现侧空腔长度较短, 一般为 3 m 左右, 水舌夹气能力低, 掺气浓度达不到减蚀临界值。如图 2 所示, 侧空腔水舌与侧壁接触线成舌状带清水层, 周边有较薄层带有极少量的掺气, 在 1:20 模型中实测掺气浓度较低^[2], 在低水头时为 0~0.9%, 水头较高时为 0.1%~1.0%, 掺气量不足, 倘存在不平整度, 易发生空蚀破坏^[4]。如美国的德沃歇克 ($\Delta b/b=0.167$), 前苏联的克拉斯诺雅尔斯克等都是在侧壁发生空蚀的实例。这种高速射流的剪切空化防止最佳措施, 就是优化体型增大掺气浓度。

在跌坎下游, 水头较低时, 跌坎处不能形成完全空腔时, 存在一水垫, 或虽形成完整空腔而掺气不充分时, 射向底板的水舌线, 斜向与底板相交汇, 在两股水流之间形成一剪切层, 其空化特性与突扩相同; 但底空腔在高水头下, 空腔有效长度较长, 一般均在 20~30 m, 夹气能力强。在 1:20 水工模型中实测靠底部冲击点的掺气浓度为 2%~3%, 能起到掺气减蚀的作用^[2], 保护长度可达 80~100 m。

① 杨顺玉. 弧门后突扩跌坎通气设施的空化特性. 泄水工程与高速水流, 1992. 2

4 掺气减蚀试验相似性及缩尺效应

由于掺气减蚀设施是实践在先,理论研究较晚,其研究难点在于水流掺气的缩尺效应,还不能通过模型预示水流流态、进气量、掺气浓度等,并不能按重力相似律引伸到原体。这一课题仍在研究中。

(1)欧文(D. A. Eryinc)指出^[4]:水工掺气模型除重力和惯性力的作用外,还受水的紊动粘滞度和表面张力的控制,所以进行掺气试验时还要考虑该水流的雷诺数 Re 和韦伯数 We 的影响。要做到原型与模型相似,根据模型试验数据,必须满足

$$\left(\frac{Q_a}{Q_w}\right)_r = 0.85,$$

式中:下标 r 表示原型与模型比; Q_a 、 Q_w 分别表示气流量与水流量。

(2)黄文杰等指出^[4]:当模型中以空腔长度为特征尺度组成的雷诺数 $Re_L = \frac{UL_c}{\nu} > 3.5 \times 10^6$ 时,以及N. L. Pinto指出的,以剪切流速 $U_s = \frac{f_0}{d}$ 与壁面粗糙 K 组成的雷诺数 $Re = \frac{K f_0 / d}{\nu} > 100$ 时,模型中测得的通气量才可以按重力相似准则引伸到原型。以空腔长度和坎上流速组成的韦伯数 $We > 500$ 时,模型中测得的通气量符合重力相似准则。

(3)时启燧等指出^[4],只有当模型中掺气坎顶的流速大于 6.5 m/s 时,模型中测得的通气量,才可按重力相似准则引伸到原型。

(4)三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式通气减蚀设施的模型试验^[2],采用的模型比尺为 35 及 20 ,相应于模型掺气坎顶流速分别为 6.0 m/s 及 7.8 m/s ,其中 $1:35$ 模型韦伯数 $We = 850$, $1:20$ 模型雷诺数 $Re = 2.6 \times 10^6$,而进气量二者差异值仍达 2 倍;且水流流态也不一样,前者水面波动小,看不见水流表面有掺气现象,后者水流表面掺气剧烈,有水流表面掺气及夹气水流层,且波动范围增大,侧空腔的水流紊动剧烈,说明缩尺效应影响还存在。

(5)福兹杜阿里亚(For do Areia)坝,坝高 160 m ,溢洪道宽 70.6 m ,全长 400 m 。为了防止空蚀,在溢洪道陡槽上设 3 道掺气挑坎。由巴拉那大学进行水工模型试验研究,采用 $1:50$, $1:30$, $1:15$ 及 $1:8$ 系列模型,试验成果整理分析^①,认为 $1:8$ 及 1

$1:15$ 的模型试验成果与原型资料对比没有明显的差别,以第 2 道掺气坎水头 83 m ,估算 $1:8$ 和 $1:15$ 两模型挑坎上流速分别为 11 m/s 和 8 m/s 。

上述实例表明,模型坎上流速要在 8 m/s 以上方可使缩尺效应的影响减到最小。

5 结 语

(1)采用弧门突扩跌坎式通气减蚀设施,必须慎重对待,应通过水工大尺度模型深入研究优化措施,充分论证,使之建立在可靠的基础上。

(2)根据水工模型试验成果,借鉴原型运行成功经验,结合实际工程试验研究,应力求第一种水流流态,并据以定出该工程弧门运行的临界工作水头 H_k ,以备控制运行。

(3)目前由于突扩结构特殊限制,一般侧空腔小,夹气能力较低,掺气浓度较小,易形成剪切空化,为防止空蚀破坏,必须提出有效措施增大侧空腔掺气浓度,这是当前研究突扩跌坎式通气设施的新课题。

(4)在跌坎下游,出口射流与底板交汇处,形成高压冲击点,与侧空腔后同样存在高速剪切层;但在临界工作水头 H_k 以上,底空腔长度较长,因而夹气能力强,一般工况下,会达到减蚀的临界掺气浓度,达到掺气减蚀的效果。

参考文献:

- [1] 朱荣林.突扩跌坎式通气设施的若干问题.见:中国水利科学研究院科学研究论文集(第21集)[C].北京:水利电力出版社,1986.
- [2] 周赤,何勇,朱世洪.三峡工程泄洪深孔突扩跌坎掺气体型 $1/20$ 单孔水工模型试验研究报告[R].长江科学院,1998.3.
- [3] 潘水波,邵嫫嫫.通气减蚀设施的设计与应用[R].中国水利科学研究院水力学研究所,1985.8.
- [4] 时启燧.掺气减蚀设施[R].泄水工程与高速水流,水电规划设计总院,1994.
- [5] 四川大学高速水力学国家重点实验室.小浪底枢纽工程#2孔板泄洪洞减压模型试验[R].1999.6.
- [6] 王才欢.小浪底水利枢纽#3孔板泄洪洞中间闸室掺气模型中间阶段试验成果报告[R].长江科学院,1999.10.

(编辑:易兴华) (下转第8页)

① 巴西·平托(N. L. Des),溢洪道掺气水流模型-原型的相似性.译者,邵嫫嫫.见:国际水工模型试验会议译文选集.泄水建筑物高速水

3 结 语

上述不同比尺模型试验研究成果表明,对于掺气设施的研究,小尺度模型(如方案 A, …, E)可以基本确定掺气槽的尺寸、跌坎坎高、明槽底板坡度等。但对于通气管尺寸、边墙高度及可能设置的盖板高度等,须通过较大尺度模型研究确定。究其原因,主要是因为不同比尺模型中,水流流速不同,水流的挟气能力不相似,从而导致通气管通气量的显著差异,以及表面紊动掺气水流的不相似。上述研究成果已被设计采纳并应用于三峡大坝的泄洪深孔中。

通过上述研究成果的分析比较,最终推荐方案

H的布置型式,但通气管直径宜选用 $\varnothing 1.4\text{ m}$ (方案 F中的通气管直径)

参考文献:

- [1] 周赤,何勇,廖仁强.三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式掺气的试验研究[J].长江科学院院报,1997,(2).
- [2] 周赤,何勇.三峡工程泄洪深孔陡槽方案试验研究[J].长江科学院院报,1998,(4).
- [3] 时启燧,潘水波,邵瑛瑛,等.通气减蚀挑坎水力学问题试验研究[J].水利学报,1983,(3).

(编辑: 聂文)

Model study on aerator of Three Gorges Project's deep outlets

ZHOU Chi, HAN Jibin, ZHU Shi-hong, HE Yong

(Yangtze River Scientific Research, Wuhan 430010, China)

Abstract By means of two hydraulic model with scales 1:35 and 1:20, some physical parameters were measured, such as flow pattern, pressure distribution, ventilation rate and air entrainment concentration. A configuration of outlet with aerator was recommended from comparison of some factors including the height of drop, the gradient of open chute, the form of roof plate and the size of ventilating holes etc. This figuration was adopted by the design. Finally, the scale effect of air entrainment on different size models is discussed in the paper.

Key words Three Gorges Project; outlets; aerator with vertical drop; scale effect

(上接第4页)

Review on study of aerators with sudden lateral enlargement and bottom drop at taintor gate region

XIAO Xing-bin, WANG Cai-huan, WANG Ye-hong

(Yangtze River Scientific Research, Wuhan 430010, China)

Abstract The gate seat of taintor gate with an eccentric hinge is special in construction and the flow condition complex. Most of them in the practical operation were successful, but a few ones as well as their peri-regions encountered cavitation damages. The causes of the latter should be found and the improvement measures proposed, so as to make these structures in engineering practice being reliable.

Key words sudden enlargement and bottom drop; hydraulic characteristics; aeration to prevent cavitation; best configuration