

三峡工程泄洪深孔掺气减蚀设施研究述评

肖兴斌

(长江科学院,湖北 武汉 430010)

摘要:对三峡工程泄洪深孔掺气减蚀设施研究进行述评,认为弧门突扩门座结构特殊,所处水流情况复杂,对于掺气减蚀的效果还待进一步研究;根据工程实际运用,跌坎掺气减蚀设施是防止空蚀破坏最经济、最有效的办法.建议采用跌坎掺气并对跌坎体型通气设施掺气浓度和缩尺效应进行深入研究.

关键词:三峡水利枢纽;泄洪深孔;弧门突扩跌坎;跌坎掺气;缩尺效应

中图分类号:TV131.3+2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)02-0051-04

三峡水利枢纽泄洪深孔是永久泄洪建筑物之一,具有水头高、流量大、孔数多、运用频繁、水位变幅大(135~180 m)等特点,其运行的安全可靠性是设计者关心的重要问题之一,为此,曾进行多个水力学模型试验研究,也比较了多个深孔体型,最终采取河床溢流坝,表孔和深孔相间布置,总计23个深孔,体型是短有压进水口(出口断面7.0 m×9.0 m),出口顶部压坡为1:4,进口底高程90.00 m,出口设弧形闸门控制流量,后接明渠泄槽,尾部挑流鼻坎,底高程79.93 m,其布置见图1.该体型空化数低,易受到空蚀威胁.为此,长江科学院水工研究所采用1:35及1:20水工模型试验^[1],在跌坎处流速分别达到5.9 m/s和7.8 m/s,雷诺数 Re 分别为 1.2×10^6 和 2.6×10^6 .研究了弧门突扩跌坎式通气减蚀和跌坎掺气水流及其掺气特性,并进行比较和充分论证,最终推荐跌坎掺气体型.

1 掺气减蚀水力设计原则及效果

1.1 掺气减蚀水力设计原则

近几年来,根据工程运用实践,认为掺气减蚀设施是防止空蚀破坏较为经济且行之有效的办法,当前国内外已作为一项新技术推广应用.

当混凝土过流面上水流流速在30 m/s左右时,可根据具体情况确定是否设置掺气减蚀设施,当流速大于35 m/s时,应设置掺气减蚀设施.

我国的水工设计手册中提出,当水流空化数 $K < 0.1 \sim 0.3$ 时必须注意空化问题.美国水利专家法

尔维(Henry T. Falvey)提出:当水流空化数 $K < 0.2$ 时,应加设掺气槽^①.美国专家布格和蒋赛廷在二滩水电站水力学问题的发言中,对水流空化数提出了一个简单的判别标准^②:水流空化数 $K > 1.7$ 时,不考虑保护措施; $1.7 > K > 0.3$ 时,严格控制不平整度; $0.3 > K > 0.12$ 时,要加设掺气设施; $K < 0.12$ 时,要修改设计.

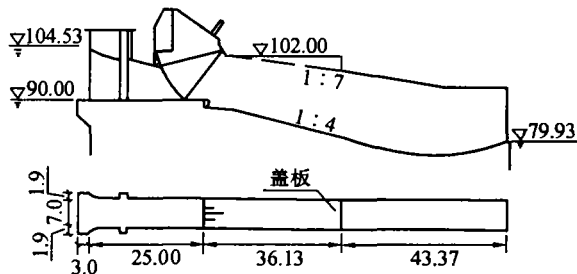


图1 三峡工程泄洪深孔跌坎掺气体型布置(单位:m)

掺气减蚀设施必须满足的基本原则是:在其运用水头范围内形成并保持一个稳定的通气空腔,以保证向下游水流供气,应力求通过掺气设施的水流平顺,避免因设置掺气设施而恶化下游水流流态和过分抬高水面线,避免使明流隧洞局部封顶,明槽边墙漫水,过高的水舌冲击其建筑物或增大冲击力.水舌冲击还应避开伸缩缝和施工缝,同时对掺气减蚀设施的体型应力求简单,以便施工并保证本身不受破坏.

1.2 减蚀效果

20世纪50年代,美国大苦里坝(Grand Coulee Dam)泄水孔出口段发生空蚀破坏^③,每年都需修补.

作者简介:肖兴斌(1927—),男,四川巴中人,高级工程师,主要从事水工水力学、高速水流水动力学研究.

① Henry T. Falvey. 陡槽及溢洪道的空化. 长江科学院译, 1991.

② 曾文其. 二滩泄洪洞减蚀措施设计简介. 成都勘测设计院水工处, 1989.

③ 潘水波, 邵瑛瑛. 通气减蚀设施的设计与应用. 水利水电科学研究院水力学研究所, 1985.

为此,于1960年在其泄水孔锥形管出口段下游设置了掺气槽,之后未再发生空蚀破坏,继后美国格林峡谷坝(Glen Canyon Dam)导流洞、黄尾坝(Yellow Tail Dam)明流泄洪洞设置3道掺气槽,进行原型试验,肯定了掺气设施的防蚀实际效果.之后前苏联在克拉斯诺雅尔斯克(Краснаярск)水电站溢流坝及底孔中设掺气设施.巴西等20多个国家在100多项工程上应用了掺气减蚀设施,都取得了减蚀效果.我国首先在冯家山隧洞中设置了掺气减蚀设施,也取得了减蚀效果,后来在丰满、乌江渡,六都寨、鲁布革、漫湾、小浪底等工程中设置掺气减蚀措施都取得了显著减蚀效果和社会经济效益.

近年来,偏心铰弧门在高水头泄水底孔中的应用日渐普遍,闸门段体型要求设置底板跌坎,侧墙突扩形式掺气减蚀的一种特有形式,即采用弧门突扩跌坎式通气减蚀设施,有美国的德沃歇克、前苏联的克拉斯诺扬斯克、日本的二瀨、巴基斯坦的塔贝拉及我国龙羊峡、小浪底等工程,由于偏心铰弧门门座结构特殊,水流情况复杂,在实际运用中,大多数已取得成功经验,但也有少数的工程在运行中出现这样或那样的问题,如德沃歇克、克拉斯诺扬斯克、塔贝拉及龙羊峡等工程仍发生空蚀破坏,这需要从中找出发生空蚀的原因,提出改进措施及注意的问题,使掺气减蚀设施发挥应有的作用.

2 弧门突扩跌坎式通气减蚀设施水力特性

为了将解决高压弧门止水问题与掺气设施结合起来,采用突扩跌坎式通气减蚀设施.

2.1 三峡泄洪深孔掺气减蚀设施方案比较^[1]

a. 第一种掺气减蚀方案.弧门突扩跌坎式通气减蚀设施,在设计水力条件下,经过8个方案比较优化,最后提出在弧门后两侧突扩0.5 m,并设折流器,跌坎高2 m,坎顶设小挑坎,坡为1:8,坎高0.1 m,坎下为5.0 m长的平段,再接20%斜坡与挑流鼻坎相接.坎底设专门通气孔;两侧突扩各设两个通气孔(图2).

b. 第二种掺气减蚀方案.闸门处两侧有突扩,底部不设跌坎,在弧门下游8.0 m处再设掺气跌坎(图3).经过5个比较方案优化试验,最后选定在弧门处两侧突扩0.5 m,加折流器(图3),从上而下0~0.35 m,侧空腔中部设通气孔($\varnothing 1.0$ m),孔底部为平底(无跌坎),距弧门底缘(关闭时)下游8.0 m处设跌坎,高2 m,坎顶设小挑坎,高(0.1 m)坎下设通气孔($\varnothing 1.0$ m),坎下为1:5底坡与挑流鼻坎相接.

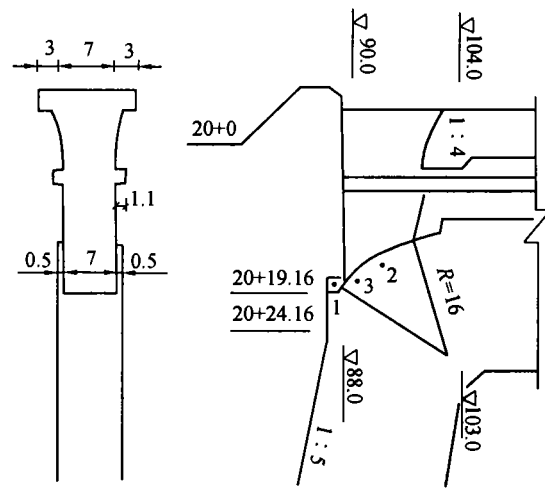


图2 三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式通气设施(单位:m)

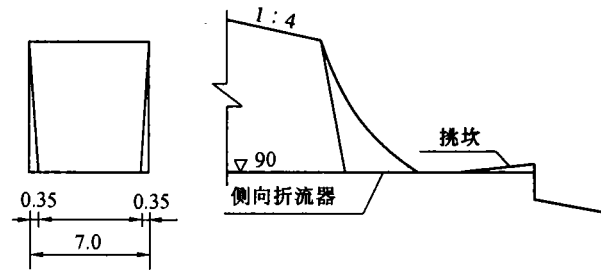


图3 侧向折流器布置(单位:m)

突扩后水流较复杂,侧空腔长约3 m,并有水翅现象产生,但水翅对弧门支铰基本无影响,加折流器后,可保证侧空腔畅通.突扩后两侧形成明显的侧空腔,突扩弧门下部(底板以上约3.0 m)形成明显的掺气旋滚水流(掺气水流层),侧空腔后仍存在清水层.侧空腔内负压为 $-1.2 \sim -56.8$ kPa(库水位135.0~175.0 m).跌坎下通气孔内风速约在20~52 m/s之间,侧向通气孔在较高水位时能正常向侧空腔供气.

2.2 弧门突扩跌坎空化特性

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4可见,突扩 Δb 的加大,会使水舌与边墙的接触角 α 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十多倍.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^[2].如小浪底3号孔板泄洪洞弧门突扩跌坎水工模型^①,当水头80~130 m时,实测突扩空腔后冲击点脉动压力均方根为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,这没有达到掺气减蚀的目的.

从模型实际观测,侧空腔长度较短,一般为3 m左右,水舌挟气能力低,掺气浓度达不到减蚀临界

①王才欢.小浪底水利枢纽3号孔板泄洪洞中间闸室掺气模型试验报告.长江科学院,2000.

值.如图4所示,侧空腔水舌与侧壁接触线成舌状带清水层,周边有较薄层带有少量的掺气.在1:20模型中实测掺气浓度较低,在低水头时为0~0.9%,水头较高时为0.1%~1.0%,掺气量不足,尚存在不平整度,易发生空蚀破坏.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,防止这种高速射流引起的剪切空化最佳措施就是优化体型,增大掺气浓度.

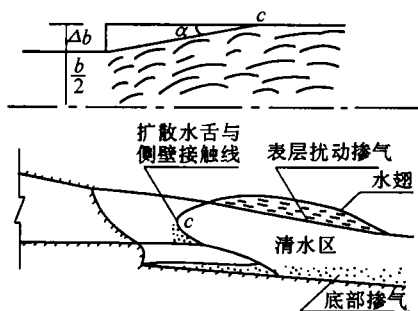


图4 突扩跌坎水流态示意图

跌坎下游水头较低,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交汇,在两股水流之间形成一剪刀层,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,一般均为20~30m,挟气能力强.在1:20水工模型中实测靠底部冲击点的掺气浓度为2%~3%,原型掺气浓度更大,能起到掺气减蚀的作用,保护长度可达80~100m.

3 跌坎掺气水力特性

弧门不设突扩跌坎,离弧门下游5m处设掺气跌坎,其泄洪深孔跌坎基本体型见图1.在跌坎后的水流及掺气特性研究中,选用几何比尺1:35及1:20的两座模型,比较了8个跌坎不同布置方案,最终选定跌坎高度1.3m,明槽底板坡度1:4,跌坎两侧通气孔 $\varnothing 1.4$ m,闸门室通气孔 $\varnothing 0.8$ m.

3.1 空腔长度

高速水流通过跌坎后,使水流底缘脱离底部边界在射流下缘形成空腔.空腔长度是掺气设施的重要水力指标.

比较研究的8个模型的跌坎高度范围在1~2m之间,试验结果表明:在135~180m运行库水位范围内,各个方案均能形成空腔.虽然由于其他因素的影响,空腔形态有所差别,但此流态观测结果亦表明,比较的8个模型跌坎高度相对影响不大,缩尺效应影响是主要的.通气孔尺寸和进气量是决定空腔长度的主要因素.本方案当库水位在135.0m时,空腔长度为14.4m,水舌挑距为20.2m.库水位为145.0~175.0m时,空腔长度为19.7~29.0m,水舌

挑距为26.0~45.4m,通气孔尺寸由 $\varnothing 1.2$ m增大到 $\varnothing 1.4$ m时,空腔长度变为24.0~34.6m.

3.2 底板压力分布

跌坎高度1.3m,通气孔尺寸 $\varnothing 1.2$ m,试验表明,在库水位为135.0m时,空腔内的负压为-0.5kPa,库水位升高负压值逐渐增大,库水位145.0~175.0m时,空腔内负压为-5.9~-24.7kPa;通气孔尺寸加大为 $\varnothing 1.4$ m时,空腔内负压降为-2.0~-16.0kPa,水舌主流已接近或落入反弧段内,水舌冲击压力峰值和反弧段压力增大值彼此接近,最大值出现在反弧段后部(桩号20+92.5m处),对应于135.0m和175.0m库水位,桩号20+92.5m断面的压力值分别为236kPa和410kPa.

3.3 底板掺气浓度分布

各方案底板掺气浓度分布基本相近,空腔内含气量大于80%,水舌跌落处附近掺气浓度为3%左右,反弧最低点以后底板掺气浓度较低,在175.0m库水位时,为0.6%~1.5%;而在较低水位时,其掺气浓度基本接近于零.原型流速较大,掺气浓度较高.观测表明:在反弧最低点以后,贴底掺气水流上逸,近底为一较薄的清水层,而随着水流紊动,掺气水流水舌落点距反弧愈近,掺气水流贴底的几率愈大.

3.4 通气孔进气量比较试验

在几何比尺为1:35的模型试验中,拟定5个方案(即A,B,C,D,E),前3个方案通气孔尺寸均为 $\varnothing 1.0$ m,方案D通气孔直径为0.9m,方案E通气孔直径为1.2m.当库水位175.0m时,5个方案通气孔进气量分别为 $69.7\text{ m}^3/\text{s}$, $74.3\text{ m}^3/\text{s}$, $65.0\text{ m}^3/\text{s}$, $56.5\text{ m}^3/\text{s}$, $91.4\text{ m}^3/\text{s}$.通气孔平均风速分别为 44.4 m/s , 47.7 m/s , 41.4 m/s , 44.4 m/s , 48.1 m/s ,表明方案A,B,C,D,E中,方案D的通气量明显偏小,通气孔面积(直径)不够,和前述压力测量结果一致.在比尺1:20模型试验中,拟定3个方案(即F,G,H),方案F通气孔直径为1.4m,其他方案通气孔直径均为1.2m,其通气孔进气量依次为 $273.8\text{ m}^3/\text{s}$, $203.4\text{ m}^3/\text{s}$, $171.9\text{ m}^3/\text{s}$,通气孔最大风速为 90.0 m/s .可见,在同一比尺(1:35)模型中,通气孔尺寸由 $\varnothing 1.0$ m增大为 $\varnothing 1.1$ m,通气量增大.两个不同比尺(1:35和1:20)模型,方案F的进气量是方案E的3倍以上.上述试验结果表明,进气量是空腔长度、空腔内的负压及掺气浓度最重要的影响因素.同时说明,模型中的观测进气量还不能直接引申到原型,主要是缩尺影响的结果.

4 通气孔尺寸及进气量的估算

考虑模型缩尺效应的影响,通气量应根据原型观测总结的经验公式,参照模型试验成果综合考虑

确定。

Pinto 等根据巴西福兹杜阿里亚溢洪道通气量原型观测资料,得出如下经验公式^[3]:

$$q_a = 0.033 v L_c \quad (1)$$

式中: q_a 为单宽进气量, m^2/s ; v 为坎上水流平均流速, m/s ; L_c 为空腔长度, m 。

设计通气孔尺寸问题,主要取决于通气孔内气体的风速,通气管的长度(考虑阻力影响)。通气孔的面积等于通气量除以允许风速。关于通气管允许风速,参考我国钢闸门设计规范的规定:允许风速为 45 m/s 。但根据乌江渡水电站原型观测,一般通气孔风速在 $50 \sim 60 \text{ m/s}$,最大达 88.8 m/s ,除噪声较大外,没有其他异常情况,建议按 $50 \sim 60 \text{ m/s}$ 风速设计通气孔面积及尺寸,会取得满意的结果。根据上述设计原则结合三峡泄洪深孔跌坎的水力条件、模型试验成果,建议在跌坎两侧各设 $\varnothing 1.5 \text{ m}$ 通气孔比较适合。

5 掺气减蚀试验相似性及缩尺效应

由于掺气减蚀设施工程是实践在先,而理论研究相对较晚,其研究的主要难点在于水流掺气的缩尺效应。目前还不能通过模型预示进气量,掺气浓度等并不能按重力相似律引申到原型,不同学者给出的结果也不同。这一问题迄今还在研究中。

a. 当模型中的空腔长度与特征尺度组成的雷诺数 $Re = \frac{v L_c}{\nu} > 3.5 \times 10^6$ 时,以及 Pinto^[4] 指出的以剪切流速 $v_a = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 与壁面粗糙高 K 组成的雷诺数 $Re_* = K \sqrt{\tau_0/\rho}/\nu > 100$ 时(τ_0 为剪切应力; ρ 为水的密度; ν 为水的运动粘滞系数; v 为坎上掺气平均流速),模型中测量的通气量才可以按重力相似准则引申到原型。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。

b. 时启燧^①等指出,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申到原型。

c. 福兹杜阿里亚(For do Arein)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。试验结果表明, $1:8$ 及 $1:15$ 的模型试验结果与原型资料对比没有明显的差别,以第二道掺气坎水头 83.0 m 估算, $1:8$ 和 $1:15$ 两个模型挑坎上流速分别为 11 m/s 和 8 m/s 。由此表明,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。

d. 夏毓常等^[5]根据若干国内外工程掺气减蚀设施通气量的原模型对比资料进行全面综合分析,并绘水力参数图表,提出模型掺气坎上水流平均流速 $v_m > 6 \text{ m/s}$,模型特征雷诺数 $Re = \frac{v L_c}{\nu} > 3.5 \times 10^6$,

模型上的韦伯数 $We = \frac{v \sqrt{L_c}}{\sqrt{\sigma/\rho}} > 1200$ (其中 σ 为水的表面张力)等条件,模型上所测得的进气量才能按重力准则引申到原型。否则,模型试验成果还存在缩尺效应影响,需加修正数:

$$\frac{\beta_p}{\beta_m} = \frac{Q_{Lp}}{Q_{Dm} L_r^{2.5}}$$

式中: β_p/β_m 为原型与模型相对掺气比; Q_{Lp} , Q_{Dm} 分别为原型和模型气流量; L_r 为模型几何比尺。

6 结 语

a. 三峡水利枢纽泄洪深孔水头高,流量大,孔数多,运用频繁。采用什么形式掺气减蚀体型,必须慎重对待,结合模型试验及原型实践充分论证,使之建立在可靠的基础上。

b. 推荐跌坎掺气设施是通过对比尺为 $1:35$ 及 $1:20$ 的两座模型进行研究,观测了水流流态、空腔长度、空腔内的负压及沿程的压力分布、冲击点压力、坎后沿程掺气浓度分布、进气量等物理量,并考虑了缩尺效应的影响及借鉴原型掺气减蚀的成功经验,结合实际工程试验研究,进行综合分析论证。

c. 通气孔尺寸及进气量是保证掺气减蚀效果的重要因素,考虑到缩尺效应影响,结合模型通气量试验成果,借鉴原型类似工程通气量观测的经验公式,用本工程的水力条件,计算通气孔尺寸。故建议在跌坎两侧各设 $\varnothing 1.5 \text{ m}$ 通气孔,可满足通气量的要求。

参考文献:

- [1] 周赤,韩继斌,何勇.三峡工程泄洪深孔跌坎掺气体型模型[J].长江科学院院报,2000(5):5~10.
- [2] 杨顺玉.弧门后突扩跌坎通气设施的空化特性[J].泄水工程与高速水流,1992(2):14~18.
- [3] Pinto N L.射流通气量的模拟[A].见:国际水工模拟缩尺影响专题讨论会译文选集[C].长江科学院,1985:112~116.
- [4] Pinto N L.溢洪道掺气水流模型——原型的相似性[A].见:高速水流情报网编译.国际水工模型试验会议译文选集[C].长江科学院,1984:128~132.
- [5] 夏毓常,张黎明.水工水力学原型观测与模型试验[M].北京:中国电力出版社,1999.105~108.

(收稿日期:2002-03-26 编辑:张志琴)

①时启燧.掺气减蚀设施.水利水电规划设计总院,1994.