

底孔的气蚀分析及减免气蚀措施的研究

西北农学院西安水利实验站 李建中

提 要

本文从具体工程的气蚀分析入手,利用能量方程导出了本文的底孔初生气穴数的计算公式,对于分离型气穴其初生气穴数 $K = 1 + \Sigma\zeta$,对于漩涡型气穴 $K = 1.5 + \Sigma\zeta$;指出了设置顶压坡、增设折流器、改善闸门底缘等工程措施对减免气蚀的作用,并介绍了利用掺气减免气蚀措施的试验研究成果。

前 言

底孔通常是在较高的水头下工作的,高速水流的气蚀问题是影响底孔正常运转的主要危害之一。底孔发生气蚀破坏的实例,近年来仍不断出现,因此进一步研究底孔的气蚀及减免气蚀的措施是当前水电工程实践急待解决的问题之一,随着我国高水头电站的迅速发展,这一问题将更为迫切。

本文将从小体工程的气蚀分析入手,提出几种减免气蚀的措施以及初生气穴数的计算公式。

一、底孔气蚀实例

陕西省二龙山水库底孔,于1974年建成并投入运行,1975年9月下旬,在底孔运行水头为43.08米的条件下,发现底孔启闭室有哨声,同时还在廊道中清楚的听到底孔内有节奏的咕当声,经检查发现闸门槽附近有严重气蚀破坏,图1的阴线部分表示该底孔气蚀破坏的范围或深度。工作门槽下游顶坎的破坏面积达整个顶坎的75%,最深处为47厘米,有四根钢筋被冲断(图1—①);门槽下游两侧墙的破坏面积达35%,蚀深在5—24厘米的范围内(图1—②);检修门门眉以上的气蚀破坏面积为1.8平方米,最大蚀深24厘米(图1—③);检修门门槽底板内有长1.0米、宽0.2米的气蚀坑,两侧对称,呈倒八字形分布,蚀深10厘米,钢筋裸露(图1—④);检修门槽下游侧墙底部有0.1平方米的蚀损面积,深约7厘米(图1—⑤)。

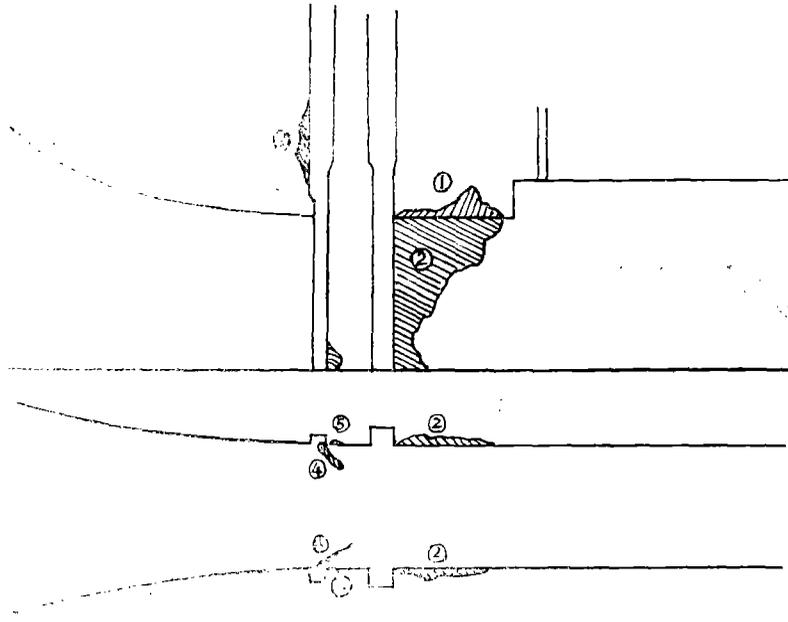


图1

二、底孔气蚀分析

为了分析底孔的气蚀，我们以二龙山底孔（图2）为例，对底孔上游的 I 断面及易发生气蚀破坏的 II 断面应用能量方程式则得：

$$H_0 = d + \frac{P_2}{r} + (1 + \sum \zeta) \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{P_2}{r} = H_0 - d - (1 + \sum \zeta) \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (1)$$

一般认为当压力 $\frac{P_2}{r}$ 降低到水的汽化压力时，发生气穴。

通常门槽附近常见的气穴有分离型气穴及旋涡型气穴两类。分离型气穴多发生在门槽下游的边墙和顶坎上，有的呈气穴腔，有的呈气穴云。旋涡型气穴一般发生在门槽内的立轴旋涡中心带，时而也带至门槽下游边墙。现对两类气穴分别讨论。

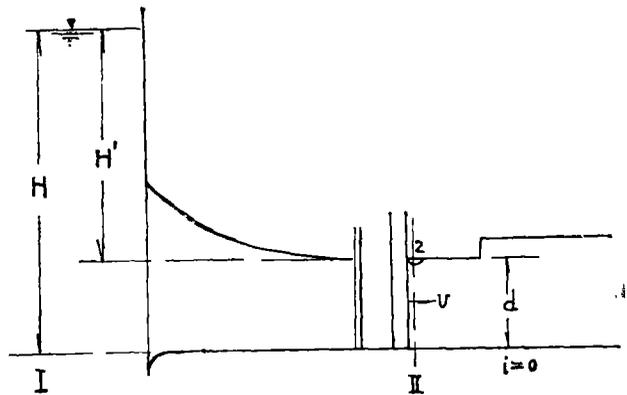


图2

(一) 分离型气穴 当水流压

力降至汽化压力形成空腔分离区后,空腔区的压力就不再降低,空腔边缘及空腔区的负压相等,此时边介上的压力 $\frac{P_2}{r}$ 等于水流的汽化压力。

即
$$\frac{P_2}{r} = h v$$

代入(1)式得:
$$H_0 - d - h v = (1 + \sum \zeta) \frac{V^2}{2g}$$

亦即
$$\frac{H_0 - d - h v}{\frac{V^2}{2g}} = 1 + \sum \zeta \dots \dots \dots (2)$$

令 $H_0' = H_0 - d$ 並忽略微小的行近流速

则
$$H' = H - d$$

这样(2)式可改写为:

$$\frac{H' - h v}{\frac{V^2}{2g}} = 1 + \sum \zeta \dots \dots \dots (3)$$

定义(3)式左端为水流气穴数K

即
$$K = \frac{H' - h v}{\frac{V^2}{2g}} \dots \dots \dots (4)$$

因为(3)式是由气穴初生的条件推导来的,所以其左端就是初生气穴数 K_0 ,这样(3)式即可写为:

$$K_0 = 1 + \sum \zeta \dots \dots \dots (5)$$

(5)式即为分离型气穴时,初生气穴数的表达式。其值随水岸至底孔内研究断面的阻力系数之和而变。

(5)式表明,初生气穴数 K_0 是随建筑物的体形而变的,是表明建筑物几何形状是否容易引起气穴水流的参数。 K 越小,说明体型越好,越不容易发生气穴。

比较由(4)式求得的水流气穴数,当 $K > K_0$ 时不发生气穴,当 $K < K_0$ 时则发生气穴,且 $(K_0 - K)$ 的差值愈大,则气穴的范围与强度愈大。

(二)旋涡型气穴 若门槽附近为旋涡型气穴,则气穴发生时,旋涡边缘的压力并不等于水流的汽化压力,而是旋涡中心的压力等于水流的汽化压力。为寻找涡心压力与涡缘压力的关系,设旋涡为圆形,应用流体力学对于等速旋转的同心圆流动的分析,可得涡缘压力与涡心内任一点的压差为

$$P_0 - P = \frac{P\omega^2}{2} (r_0^2 - r^2)$$

即 r 愈小,压差值就愈大,当 $r = 0$ 时,涡缘与涡心的压差就为:

$$P_0 - P = \frac{P\omega^2 r_0^2}{2} = \frac{P u^2}{2} \dots \dots \dots (6)$$

一般涡缘流速应小于断面平均流速;另外由于涡的存在使过水断面减小,所以我们假

定涡缘流速为断面平均流速的0.7倍

将 $u = 0.7U$ 代入 (6) 式得

$$\frac{P_0}{r} - \frac{P}{r} = 0.5 \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

因此, 对于旋涡型气穴, 当 $\frac{P_2}{r} = 0.5 \frac{V^2}{2g} = h_v$ 时, 气穴才初生。将此条件代入 (1) 式

即得

$$h_v + 0.5 \frac{V^2}{2g} = H_0 - d - (1 + \sum \zeta) \frac{V^2}{2g}$$

此式亦可改写为:

$$\frac{H' - h_v}{\frac{V^2}{2g}} = 1.5 + \sum \zeta \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{亦即 } K_i = 1.5 + \sum \zeta \dots\dots\dots (9)$$

此式即为旋涡型气穴时, 初生气穴数的表达式。

下面利用上述分析所得的成果, 对二龙山水库底孔的气蚀破坏原因进行分析。

根据 1975 年二龙山底孔实际过水情况, 按公式 (4) 计算出的水流气穴数 $K = 1.450$ 。

二龙山底孔的气蚀破坏, 主要在门槽附近, 而门槽的气蚀破坏主要为旋涡型气穴所引起, 所以应按公式 (9) 计算其初生气穴数。

按式 (9) 计算出的检修门槽末端的初生气穴数 $K_i = 1.567$, 而工作门槽末端的初生气穴数 $K_i = 1.630$ 。

检修门槽及工作门槽的初生气穴数均大于水流气穴数, 所以两个门槽附近都有气蚀破坏, 但由于检修门槽的 $(K_i - K) = 0.117$, 小于工作门槽的 $(K_i - K) = 0.180$ 的值, 因此工作门槽附近的气蚀破坏范围与强度均较检修门槽严重。

至于检修门门眉以上的气蚀破坏, 主要是由于检修门顶止水与门眉之间的缝隙射水而形成的缝隙气穴造成的。在检修门的某些开度下, 顶止水已失去作用, 在闸门与门眉之间形成一条缝隙, 而向闸门井内射水; 或者由于顶止水失灵而形成的缝隙射水。模型试验证实, 当检修门开度为 0.75 米, 在闸门与门眉之间若有 1—2 毫米的缝隙, 射水就可达 15—18 米高, 缝隙出口的射水流速达 17—20 米/秒, 这样大的流速, 在缝隙后的局部地区, 已足以造成气蚀破坏。

三、减免底孔气蚀措施的研究

(一) 改善进口体型, 设置顶压坡

由于底孔门槽附近的压力往往很低, 水流气穴数很小, 容易发生气蚀破坏, 因此在门槽下游段加设顶压坡对提高门槽部分的压力起显著作用。二龙山底孔, 在无压坡时出现气

蚀破坏,而加压坡后门槽附近的压力完全变成了正压,一般压力提高达几倍至几十倍,其值随压坡比的增大而增加。

设置顶压坡的措施大大提高了门槽水流的气穴数。在二龙山底孔工作门槽下游顶坎设置 1 : 5 的顶压坡后,使检修门槽断面的水流气穴数由 0.37 增至 1.05,使工作门槽断面的水流气穴数由 0.39 增至 1.09,水流气穴数提高达 2.8 倍,说明设置顶压坡措施(图 3)对减免气蚀的巨大作用。

设置顶压坡措施的缺点是泄流能力有所减小,其减小的程度可按根据试验资料得到的以下经验关系式估算。

$$\frac{Q_i}{Q_0} = 1 - 0.825 i$$

式中: Q_i 为压坡 i 时的泄流能力

Q_0 为压坡 $i = 0$ 时的泄流能力

i 为顶压坡比

一般当顶压坡为 1 : 5 左右时,泄流能力约比无压坡时减小 15% 左右。

(二) 改善门槽体型,对改建工程可增设折流器

新设计的底孔进口,应力求设计为合理的门槽体型,但许多已建工程,由于采用矩形门槽,往往发生程度不同的气蚀破坏,根据我们的试验,对改建工程,在门槽上游边墙增设折流器的措施(图 4)是减免气蚀的有效途径。

增设折流器,可消除门槽下游边墙的气穴并使门槽内的旋涡型气穴大大变弱,由于折流器引起的水流内部的气穴是起气穴,对建筑物没有破坏作用。

折流器的挑角(或坡比)可根据射流扩散不接触下游边墙的原则确定。

(三) 在紧接门槽后的压力段增设通气孔

在闸门槽下游顶坎上设置通气孔对于减小局部负压及闸门小开度时的补气,以避免气蚀有较显著的作用。二龙山底孔门槽下游顶坎的严重气蚀破坏,除门槽体形设计不善外,在门后顶坎上没有通气孔也是一主要原因。试验证实,加设通气孔后,在闸门小开度运行时,门后原有的水流飞溅现象减弱。

(四) 改善闸门底缘型式

当闸门小开度运行时,闸门底缘的型式对于门槽内是否会发生气蚀是有影响的。二龙山底孔闸门的底缘止水在上游端,底缘斜边迎向下游,因之闸下出流的水流分离点处在门槽上游端,底缘扰动门槽内水流,加剧了槽内的旋涡强度,促使了气穴的发生。若改变底缘型式,使底缘斜面迎向上游,水流分离点处在门槽下游端附近时,门槽内水流流态显著好转,减压试验证实没有发生气穴。所以较优的闸门底缘型式应为底缘斜坡迎向上游者,以 45° 为宜。

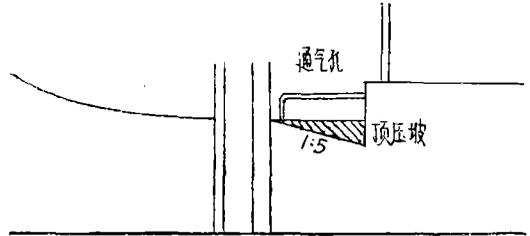


图 3

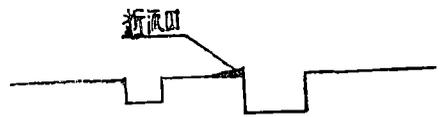


图 4

四、利用掺气减免气蚀措施的试验研究

利用掺气使局部低压区的压力提高以减免气蚀，这是当前减免气蚀最有效的措施。

据试验，当掺气量为2%左右时，气蚀的破坏已可减至清水情况的10%，掺气量为7%以上时，气蚀基本消失。

下面主要介绍我们对于陕西省石头河泄洪洞通气设施的试验研究成果。

石头河泄洪洞系利用原左岸导流洞改建的“龙抬头”式的永久泄洪洞，其泄洪气穴数均很低，由于不平整度而发生气蚀破坏的可能性是较大的，尤其对于反弧段及其下游40—50米的范围内，鉴于已建的类似工程（如美国黄尾坝及我国的刘家峡泄洪洞）发生气蚀破坏的先例，应给予特别的重视。

在工作门小开度的运行条件下，最小泄洪气穴数均发生在反弧段下游的7米左右，所以反弧段前后，在施工中应严格控制不平整度，力求平整光滑。但施工中要达到平整光滑的要求是困难的，往往也是难以完全达到的，所以采用通气设施利用掺气来减免气蚀的破坏就更为必要。

我们主要研究了石头河泄洪洞通气设施位置的确定及通气设施型式的选择。

（一）通气设施位置的确定

通气设施的部位应设置在泄洪洞易发生气蚀部位的上游，以使容易发生气蚀部位的水流成为掺气水流，这是最主要的考虑原则。

根据国内外几个“龙抬头”式泄洪洞都易在反弧段及其下游一定范围内发生气蚀破坏的实例，我们将石头河泄洪洞的通气设施的位置选择在反弧段上游的直线段上及反弧段末端两处，经模型试验证明上述位置的选定是合理的。

（二）通气设施型式的选择

所选的通气设施的型式，应使泄洪洞保持良好的流态，不能使流态恶化；在各种运行情况下都能对水流供气，这是在通气型式的选择上最重要的原则。

目前国内外的通气设施，我们把它们归纳为四种型式，即槽式通气；突扩式通气；小挑坎式通气及大台阶式通气。

对石头河泄洪洞的反弧段上游的斜坡段（直线段）上我们选用了小挑坎式通气，而在反弧段末端的位置我们选用了槽式通气。

1、小挑坎式通气

对于小挑坎的角度，我们曾进行过6°、8°、10°、12°的方案试验，发现挑角较小的气腔长度太短，通气不够充分，但挑角大于10°时，虽通气良好，但水面变化剧烈。经比较，我们认为选用挑角为10°的小挑坎，其坎高为80厘米是可行的（图5）。侧墙采用暗管式通气。

试验表明，这种小挑坎式通气设备，对水流

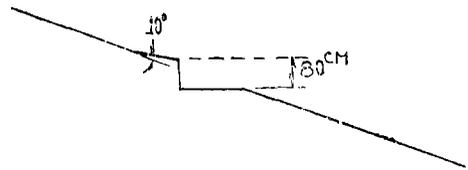


图 5

流态影响极小，通气均匀，掺气充分，多数情况下有一层乳白色的掺气水流紧贴反孤底部。气腔内通常均保持0.05米负压。

由于小挑坎而形成的气腔长度是随水头的增高而增大的。通气量愈大，气腔长度愈长。即就是说挑坎上的福氏数 Fr 愈大，气腔长度就愈长，通气量也就愈大。

2、槽式通气

我们推荐的通气槽断面为 0.8×0.8 米，上游挑坎与底面夹角为 6° ，挑坎长度在底面皆为0.5米。边墙亦采用 6° 的等角挑坎，挑坎长度边墙下部为0.5米，向上逐渐缩短直至最高水面为零。通气槽与下游的连接采用了 9° 的倒坡。（图6）

水流通过此种通气槽时，不仅脱离底板形成底部空腔，而且也脱离边墙，射至下游，因之掺气比较充分，但易在下游形成水翅与水冠。水翅与水冠在低水头、小开度运行时最高，随水头的增大而减小，直至最大水头时基本消失。气腔长度亦随水头的增大而增长。

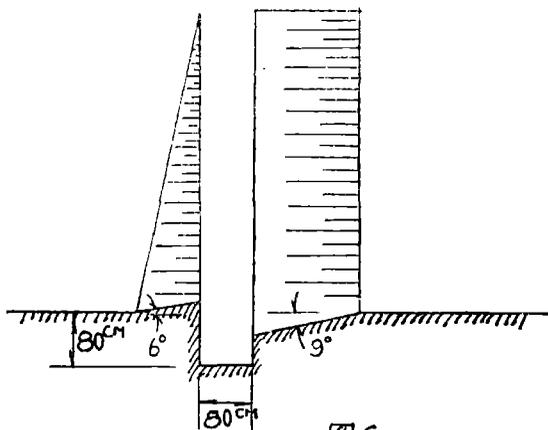


图6

参 考 资 料

- 1、《二龙山水库底孔的气蚀》，西农西安水利实验站，1978年4月。
- 2、《工程流体力学》，考夫曼（法国），1957年。
- 3、《石头河水库泄洪洞减压水工模型试验报告》，西农西安水利实验站，

1976年12月。