

# 高水头平板闸门水力特性研究

肖兴斌,王业红

(长江科学院,湖北武汉 430010)

**摘要** 结合三峡水电站排沙底孔工作平板闸门进行了高水头闸门水力特性试验研究.内容包括在开启过程中,闸门底缘后漩涡水流剪切空化引起的闸门空蚀、振动及通气减蚀措施,闸门总体布置及最佳体型,闸门位置及底缘合理形式,加折流器及闸室区水流脉动特性.提出了防止闸门空蚀及振动的具体措施,为高水头闸门结构设计提供科学依据.

**关键词** 平板闸门;空蚀;脉动压强;水力特性;三峡水电站

**中图分类号** TV134      **文献标识码** A      **文章编号** 1006-764X(2001)04-0029-04

随着水电事业的发展和高坝大库的涌现,闸门尺寸和作用水头均不断增加.闸门的工作水头越高,高速水流的水力学问题越多,闸门孔口面积越大,金属结构的力学问题及加工工艺问题越突出,闸门承受的总水压力越大,启闭设备的铸造、锻造、加工越困难.工作水头、孔口面积与总水压力这三项指标是反映闸门水平的主要指标<sup>[1]</sup>.巴西伊泰普深孔定轮平板门导流底孔闸门工作水头 140 m,孔口面积达 147.4 m<sup>2</sup>,总水压力达 199.81 MN.法国谢尔邦松的履带式深孔平板门,工作水头达 126 m,面积达 68.2 m<sup>2</sup>,总水压力达 84.30 MN.最大滑动深孔平板门工作水头 110 m,孔口面积 78.8 m<sup>2</sup>,总水压力 66.10 MN.最大深孔弧形门工作水头达 136 m,孔口面积 156.2 m<sup>2</sup>,总水压力 93.47 MN.我国刘家峡导流定轮深孔平板门,工作水头 110 m,孔口面积 130 m<sup>2</sup>,总水压力达 140.28 MN;深孔弧门以东江为代表,工作水头 120 m,孔口面积 45.4 m<sup>2</sup>,总水压力达 53.48 MN.从工作水头来看,我国已进入世界先进行列,而孔口面积和总水压力还存在较大差距.高水头闸门主要技术难题,反映在高速水流下闸门的空蚀、振动及水流脉动.为保证闸门的安全运行,对大、中型较高水头的工作闸门,一般要通过水工模型试验进行研究.本文结合三峡水电站排沙底孔高水头平板闸门水力特性研究,探讨闸门体型及其空化特性、通气对空化特性的影响、闸门底缘水流特性、门槽内水流漩涡、门槽区的水流脉动及窄缝门槽的水力特性等问题.通过试验得出的成果,可为高水头闸门结构设计提供科学依据.

## 1 高水头闸门防止空化及振动的措施

### 1.1 闸门总体布置

闸门总体布置的制约因素较多,要因地制宜.在优选方案,选定深孔底孔布置时,因其有较高的工作水头,流速大、水流空化数较低,在闸室段(包括门槽)易发生空蚀破坏.根据实践经验,必须将闸门布置在高压区.深孔或输水道高压区在进口段一般布置有事故或检修门,出口段往往是流速较大的低压区.需在出口段闸室断面后管道采取收缩或管道顶部下压(深孔底门后顶部下压 1:4 ~ 1:6 压坡)措施,以提高闸室段的压强,增大水流空化数,防止空蚀发生.

### 1.2 闸门后通气孔进气量及位置尺寸研究

三峡水电站排沙底孔高压平板闸门位于排沙底孔出口段.排沙底进口高程 89.75 m,管道直径 5 m,全长 186.35 m,出口高程 60.5 m.出口收缩段(即闸门段)由直径 5 m 的管道收缩成面积为 3.2 m × 5.0 m (宽 × 高)的管道,渐变段长 12 m,接闸门(3.2 m × 5.0 m)段 1.4 m 后,再由闸门后顶板下压 1:9.7,坡度至出口断面(2.8 m × 4.0 m),收缩段长 9.7 m,断面收缩系数为 0.7.闸门工作水头为 89.5 m,孔口面积 16 m<sup>2</sup>,总水压力为 14.05 MN.采用模型(比尺 13.37)进行闸门水力特性试验研究.

#### 1.2.1 通气孔设置的必要性

三峡电站排沙底孔布置经水工模型试验研究后,将出口断面收缩为 2.8 m × 4.0 m,闸室断面为 3.2 m × 5.0 m.当闸门全开时,在各级库水位下(135.0 ~ 150.0 m),闸室水流空化数 2.0 左右,均远

大于闸门初生空化数 0.5, 不会发生空蚀, 但在闸门开启过程中(主要是闸门开度  $n = 0.6 \sim 0.4$ ), 闸门底缘及门槽下游均存在较大负压, 空化问题需加防范; 另外闸门下游的漩滚水流与底部高速水流相互剪切, 有可能产生边壁剪切空化。为减免空蚀, 可采用下列措施: ①改善过流边壁的轮廓形式; ②选用抗蚀性能较强的建筑材料; ③合理控制和处理施工不平整度; ④壁面掺气等。对三峡水电站排沙底孔闸门而言, 因其有水头高、流速大、水流挟沙等特点, 另在闸门启闭过程中, 门后负压较大, 对空化、振动及启闭都不利, 最好是采用掺气减蚀措施, 在闸门后顶部设置通气孔, 用通气消除不利因素。

### 1.2.2 通气量的计算及观测成果

康拜尔(Campbell)根据几个工程的原型观测资料, 提出计算通气量的经验公式:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.04(Fr - 1)^{0.85} \quad (1)$$

式中:  $Fr$  为闸下收缩断面佛氏数;  $Q_a$ ,  $Q_w$  分别为通气量和孔泄流量。

根据三峡水电站排沙底孔试验资料, 闸门开度  $n = 0.6$  时, 门后水流漩滚最强烈, 负压最大。以  $n = 0.6$ ,  $H_{\text{上}} = 150 \text{ m}$ ,  $H_{\text{下}} = 73.8 \text{ m}$ ,  $Q_w = 271 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Fr = 7.6$  代入式(1)得  $\beta = 0.2$ ,  $Q_a = 54 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

通气孔风速在有关规范中建议允许值为  $45 \text{ m/s}$ 。根据 1982 年乌江渡水电站实测通气孔风速, 一般为  $50 \sim 60 \text{ m/s}$ , 最大达  $108.4 \text{ m/s}$ , 除噪声较大外, 没有其它异常情况, 据此提出通气孔可按风速  $60 \text{ m/s}$  设计, 通气孔总面积为

$$A_a = Q_a/v_a = 54/60 = 0.9 \text{ m}^2$$

可选用两个直径为  $0.8 \text{ m}$  的通气孔。

经试验测出通气量与计算相符, 并在闸门启闭过程中(局部开启试验)若不设通气孔, 闸门后存在较大负压, 可能产生空蚀及振动现象, 如闸门开度  $n = 0.4 \sim 0.6$ , 闸后有  $60 \sim 100 \text{ kPa}$  的负压, 在闸门后顶部设置通气孔后, 闸门后的负压降为  $1 \sim 3 \text{ kPa}$ , 通气孔降低负压效果显著。当只开一个通气孔时, 闸门后压升高到  $20 \sim 40 \text{ kPa}$ 。建议在闸后顶板上设 2 根直径为  $0.8 \text{ m}$  的通气孔。

### 1.3 闸门门槽体型的研究

美国水道试验站<sup>[2]</sup>曾就诺福克坝泄水道闸门槽空化问题进行过研究, 比较了非流线型(矩形方角门槽)和流线型门槽的水工模型(比尺 1:6)试验结果, 肯定了流线型(门槽)的优越性。综合国内外对门槽水流空化特性研究结果, 认为高水头下, 闸门体型采用流线型门槽形式。

合理选择门槽轮廓线可在一定范围内降低初生

空化数, 以利防止空蚀。适当选择门槽宽深比, 可减轻漩涡强度。

我国高压闸门设计规范推荐的平面闸门门槽形式如下<sup>[3]</sup>: ①适宜的宽深,  $W/D \geq 1.5 \sim 2.0$  ( $W$  为门槽宽度,  $D$  为门槽深度); ②较优的错台,  $\Delta/W = 0.05 \sim 0.08$  ( $\Delta$  为错距); ③较优斜坡,  $\Delta/L_{ek} = 1/10 \sim 1/12$  ( $L_{ek}$  为斜坡段长度); ④较优圆角半径,  $R = 30 \sim 50 \text{ mm}$ , 或圆角比  $R/D = 0.1$ ; ⑤门槽初生空化数  $K_0 = 0.4 \sim 0.6$ 。

### 1.4 门槽前加折流器研究

根据国内外有关资料介绍, 在门槽前加折流器, 对降低或减弱门槽内漩涡, 防止门槽空化空蚀有利。

美国派克坝在门槽上游装有楔形折流器<sup>[2]</sup>, 使流经门槽的射流在门槽折离, 以降低门槽漩涡强度, 避免门槽下游边角产生分离型空化。

葛洲坝二江电厂大机组排沙孔水工模型试验中, 曾在门槽上游加折流器(坎高  $0.1 \text{ m}$ , 坡度  $1:10$ ), 将水流挑离门槽, 既可降低门槽内漩涡强度, 又可减轻高速水流对门槽区边墙的冲击与磨损。但在实际施工中未予采用。

在三峡电站排沙孔闸门水力学试验中, 门槽上游加设了折流器(坎高  $0.1 \text{ m}$ , 坡度  $1:10$ )。在库水位  $150.0 \text{ m}$ , 下游水位  $73.8 \text{ m}$  和  $67.5 \text{ m}$ , 闸门全开时, 加折流器后门槽下游附近壁面压强降低  $14 \sim 87 \text{ kPa}$ , 远处压力升高, 说明水流经折流器折射后, 冲击点下降, 降低了槽内漩涡强度, 避免了水流在门槽下游边角的二次分离型空化。

加折流器后, 闸后部分开启时, 门槽及下游附近边壁压强升高  $20 \sim 40 \text{ kPa}$ ; 开度  $n = 0.8$  时, 闸门区为较大正压, 两侧壁中心线压力达  $200 \sim 330 \text{ kPa}$ ; 开度  $n = 0.6 \sim 0.4$  时, 受闸门开启程度影响, 闸门后空腔两侧有贴壁水翅生成, 门槽后侧壁有负压出现, 最大值出现在右侧 3~4 号测点, 其值为  $-20 \sim -30 \text{ kPa}$ 。

加折流器后, 闸门全开时的门槽水流脉动压力略有减小, 其脉动压力标准为  $3.7 \sim 7.1 \text{ kPa}$ , 脉动压强系数为  $\beta = 0.015 \sim 0.026$ , 主频为  $0.25 \text{ Hz}$ ; 门槽下游侧壁水流脉动压力标准差为  $6.3 \sim 39.0 \text{ kPa}$ , 脉动压强系数  $\beta = 0.08 \sim 0.15$ , 主频为  $0.5 \sim 1.5 \text{ Hz}$ ; 门槽下游侧壁水流脉动压力标准差为  $1.6 \sim 33.0 \text{ kPa}$ , 脉动压强系数  $\beta = 0.01 \sim 0.09$ , 主频为  $0.25 \sim 2.75 \text{ Hz}$ 。

根据加折流器后闸门区动水压及流态分析, 并与未加折流器时情况对比, 可以看出: 加折流器后, 门槽内水流脉动压力略有降低, 也降低了门槽内漩涡强度, 但门槽下游侧壁脉动压力却有增加。闸门部分开启时, 射流表层水流较紊乱, 两侧壁局部区域有  $-20 \sim -30 \text{ kPa}$  的负压。因此, 鉴于三峡电站排沙

底孔闸门布置在输水管道出口收缩段,出口受水流淹没,且已采用标准门槽,故加折流器的意义不大。

## 2 闸门区水流空化特性研究

### 2.1 闸门全开时,门槽空化特性研究

三峡电站排沙底门槽型式为  $W/D = 1.45$ ,  $\Delta/W = 0.075$ , 斜坡比  $\Delta/L_{ek} = 1/12$ ,  $R/D = 0.15$ , 属于标准门槽型式。经多次试验,选定闸门布置在管道出口段,闸门尺寸为  $3.2\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ , 门后为长  $9.7\text{ m}$  的收缩段,出口断面为  $2.8\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ , 收缩面积比为  $0.7$ 。这样有利于提高闸室段压力水流空化数。

排沙底孔闸门全开时,门槽水流空化数定义为

$$K = \frac{P_0 + P_a - P_r}{v_0^2 (2g)} \quad (2)$$

式中:  $P_a$  为大气压;  $P_r$  为饱和蒸汽压力;  $P_0$ ,  $v_0$  分别为紧靠门槽上游断面平均压力和平均流速。

当排沙底孔工作闸门全开时,门槽水流空化数见表 1。

表 1 排水底孔工作闸门全开时门槽空化数

| 上游水位<br>/m | 下游水位<br>/m | 流量 $Q$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 平均流速 $v_0$<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 门前平均压力<br>/kPa | 空化数<br>$K$ |
|------------|------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|------------|
| 150.0      | 73.8       | 363                                            | 22.7                                             | 452.0          | 2.11       |
| 150.0      | 67.5       | 384                                            | 24.0                                             | 408.0          | 1.73       |
| 145.0      | 73.8       | 347                                            | 21.7                                             | 437.0          | 2.24       |
| 140.0      | 73.8       | 333                                            | 20.8                                             | 418.0          | 2.35       |
| 135.0      | 73.8       | 319                                            | 19.0                                             | 369.0          | 2.56       |
| 135.0      | 67.5       | 337                                            | 21.0                                             | 338.0          | 1.95       |

由表 1 可知,在各级水位下闸门门槽处水流空化数为  $1.73 \sim 2.56$ , 大于该门槽的初生空化数  $0.4 \sim 0.6$ 。

### 2.2 闸门启闭过程(或局部开启)中压强及空化数

#### 2.2.1 闸门区压强分布

在未设通气孔的条件下,进行了不同开度( $n = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ )试验。在上游水位  $135 \sim 150\text{ m}$  及下游水位  $73.8\text{ m}$  和  $67.5\text{ m}$  工况下,观测了门前后(包括孔顶、孔侧、孔底及闸槽后各部位)压强分布。在闸门启闭过程(或局部开启)中,闸门前各部位均为较大的正压,一般达  $300 \sim 500\text{ kPa}$ , 闸门后顶部、侧部负压达  $-60 \sim -100\text{ kPa}$ 。设置通气孔  $2\varnothing 66\text{ cm}$  后,负压降低到  $-1.0 \sim -3.0\text{ kPa}$ , 个别点位存在  $-20\text{ kPa}$  的负压。以库水位  $150\text{ m}$ 、下游水位  $73.8\text{ m}$ 、闸门开度  $n = 0.6$  为例,闸门后不设通气孔时受水舌收缩及尾水淹没影响,闸门后顶部形成水汽混合漩滚流,漩滚长度约  $6 \sim 7\text{ m}$ , 闸门后顶  $1 \sim 8$  号测压管测出  $-95\text{ kPa}$  的负压, 9 号测压管(即出口顶部)为  $102\text{ kPa}$  的正压,在门槽后侧墙中心线上, 8 ~ 14 号测

压管为  $-30 \sim -60\text{ kPa}$  的负压, 16 号(即出口侧部)则为  $105\text{ kPa}$  的正压;孔底中心线上的压力均为正压,在闸门后顶部负压区通气后,闸后流态立即发生变化,类似远驱水跃,并有空腔形成,空腔长度  $6 \sim 8\text{ m}$ , 空腔内压力为  $-1.0 \sim -3.0\text{ kPa}$ 。除高速射流表层与两侧壁面接触处还有局部负压(12 号测点为  $-20\text{ kPa}$ )外,其它部位均大幅度上升为正压,尾部顶板 9 号测点压力由  $2.0\text{ kPa}$  上升到  $60\text{ kPa}$ , 底板压强由  $20\text{ kPa}$  上升到  $60\text{ kPa}$ 。

#### 2.2.2 闸门部分开启时闸门区空化特性

闸门部分开启或开启时,闸门区水流空化数为

$$K = \frac{P_a + P_c - P_r}{v_c^2 (2g)} \quad (3)$$

式中:  $P_c$  为闸门后顶板最小压强;  $v_c$  为闸门下水流收缩断面平均流速。

有关文献指出<sup>①</sup>,在闸门部分开启( $0.1 \leq n \leq 0.9$ )工况下,如闸门后为有压流且无专门掺气措施,当水流脱离闸门槽和闸门底缘时,空化可沿闸孔敞开部分的全部周界发生,但不同部位发生空化的条件是不同的,发生的时间也远比闸门全开时早得多。主要表现在不同部位发生射流上方的脱离区,该区域极有可能发生剪切空化。对于闸门具有下游止水的情况,认为临界空化数  $K_{kp} = 1.6 \sim 2.2$ 。

由模型试验资料计算的闸门区水流空化数见表 2。

表 2 不同开度的闸门区水流空化数

| 闸门开度<br>$n$ | 上游水位<br>/m | 下游水位<br>/m | 水深<br>/m | 流速<br>$v_c$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 压强<br>/kPa | 空化数<br>$K$ |
|-------------|------------|------------|----------|------------------------------------------------|------------|------------|
| 0.8         | 150.0      | 73.8       | 3.6      | 30.7                                           | 123.0      | 0.47       |
| 0.6         | 150.0      | 73.8       | 2.0      | 31.4                                           | -91.0      | 0.02       |
| 0.4         | 150.0      | 73.8       | 1.8      | 30.4                                           | -55.0      | 0.09       |
| 0.2         | 150.0      | 73.8       | 0.9      | 17.0                                           | 37.0       | 0.94       |

由表 2 可知,当闸门部分开启时,闸门区水流空化数为  $0.02 \sim 0.94$ , 远小于临界空化数。故闸门开启过程中,闸门后有可能产生剪切空化,必须采取专门掺气措施加以消除。

## 3 闸门底缘型式与闸门门槽流态

### 3.1 门槽内水流流态

关于闸门槽内水流漩涡强度问题研究尚少,但设计者对此非常关心。文献[4]中矩形门槽内速度表达式为

$$U = -2 \left[ -\frac{3}{4} \cdot \frac{v_0}{b(3a^2 + 2b^2)} \right] y(a^2 - x^2) \quad (4)$$

$$v = 2 \left[ -\frac{3}{4} \cdot \frac{v_0}{b(3a^2 - 2b^2)} \right] x(b^2 - y^2) \quad (5)$$

①陈肇和等译.泄水建筑物水力计算手册.水利水电规划设计总局,1993.

式中： $a = W/2$ ； $b = D/2$ ； $x, y$  是以门槽中心为原点的坐标。

按以上公式计算出三峡电站排沙底孔工作闸门槽内漩涡流速最大为  $10\text{ m/s}$ ，流速分布见图 1。

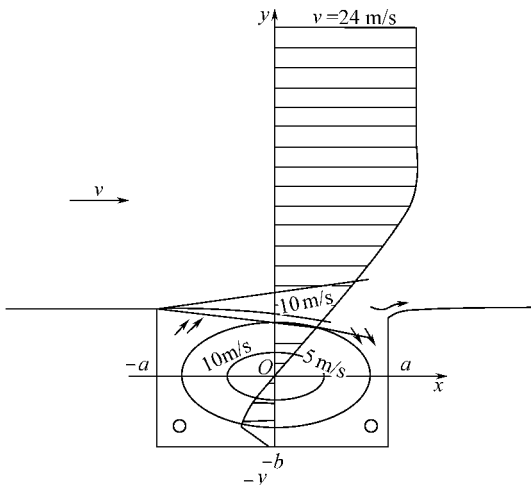


图 1 门槽漩涡流速流态示意图

### 3.2 门槽内水流脉动特征

观测了门槽内水流脉动压强，在库水位  $150.0\text{ m}$ 、下游水位  $67.5\text{ m}$ ，闸门全开的工况下，门槽前（侧墙干中心线）脉动压强均方根  $\sigma$  为  $4\text{ kPa}$ ，门槽内为  $3\text{ kPa}$ ，门槽下游（转角后）为  $3.9\text{ kPa}$ ，其主频率均为  $0.5\text{ Hz}$ 。库水位  $135\text{ m}$ 、下游水位  $67.5\text{ m}$  时，门槽前为  $6.9\text{ kPa}$ ，门槽内为  $6.4\text{ kPa}$ ，门槽后为  $7.9\text{ kPa}$ 。说明该门槽内水流紊动强度并不比门前、后大。但在局部开启时，情况相反，如库水位  $150\text{ m}$ ，闸门开度  $n = 0.6$  时，门槽前脉动均方根值为  $12.3\text{ kPa}$ ，门槽内为  $44\text{ kPa}$ ，门槽后为  $16\text{ kPa}$ ，门槽内水流脉动压强均方根值比门槽前大  $3.6$  倍，比闸门全开时增大  $11.3$  倍。这是由于闸门局部开启时，受闸门底缘水舌冲击，门槽内水流脉动强度加大的影响所致，符合一般规律。

通过门槽内水流涡流流速计算及水流脉动压力观测表明，该门槽内水流涡流强度不大，亦说明该门槽宽深比选择得比较适当。

### 3.3 闸门底缘刀口位置与流态

闸门在启闭过程中或部分开启时其底缘型式对门槽水流特性及下游流态等均有影响。三峡电站排沙队底孔闸门原设计刀口在上游面，在闸门部分开启工况下，门底流在垂向收缩的同时向两侧门槽内扩散，加强了门槽漩涡强度，其高速射门槽下游壁面激发的水翅在空腔内向上抛起且横向扩散，水翅最大高度均在  $1.3\text{ m}$  左右，有时反射（水翅）水舌遮蔽通气孔，影响通气孔正常进气，其主要表现为通气孔风速时大时小，没有规律性，空腔内射流表面比较紊

乱，水跃前后摆动幅度亦较大。

陕西省羊毛湾和桥峪两座水库的泄洪洞曾经由于上述类似的原因而发生闸门振动和闸门区空蚀破坏<sup>①</sup>，试验研究表明，将闸门底缘刀口改在下游面，当闸门部分开启时，水流脱离闸门底缘后横向联合向扩散受到限制，空腔内无次生流（水翅）产生，通气孔进气顺畅，闸门振动减轻，闸门区流态改善，未再发生空蚀。

根据上述试验成果和已有的工程实践经验，将三峡电站排沙队底孔闸门底缘刀口改到下游面。试验表明，门后空腔内无水翅出现，通气孔进气顺畅，空腔内水流态变比较稳定。

### 3.4 闸门底缘型式比较试验

闸门底缘型式要适应各级水头不同开度的复杂性高速成水流条件，要求在各级水力条件下，底缘协定输送上不产生较大负压，以避免空蚀发生同时还要求不要产生较大的上托力，影响闸门的启闭。

1964 年奈塔沙对闸门底缘倾角  $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  情况下的上托力进行了系统试验研究，其中以  $\theta = 30^\circ$  情况下的资料最为完整，从这些资料可归纳出如下结论：

a. 底缘倾角  $\theta$  愈大，上托力愈大，因为在小倾角情况下，水流绕过底缘容易发生分离，水流分离致使底缘边界产生负压或形成空化，从而导致上托力减小而形成下吸力。反之亦然，倾角愈大，上托力愈大。

b. 在闸门开度  $n < 0.5$  时的情况下，上托力与开启高度成反比<sup>[5]</sup>；而在  $n > 0.5$  时，上托力与  $e/T$ （ $T$  为闸门厚度）成正比。

c. 闸门底缘头部宜为圆弧形， $R \geq 0.25T$ ，否则易产生较大负压，一般采用  $R = 0.4T$ ，倾角  $30^\circ$  较多。三峡电站排沙底孔闸门、底缘型式比较了椭圆曲线、双层圆弧曲线等，都测出较大的负压，参考上述闸门底缘试验成果，最后选定闸门尺寸  $3.2\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ ，门体厚度  $0.70\text{ m}$ ，底缘上游头部圆弧半径  $R = 0.2286\text{ m}$ ， $R = 0.33T$ ，倾角  $45^\circ$ 。在各级水位（含水头  $90\text{ m}$ ）的不同开度情况下，底缘边界上均无负压发生。有较大的正压分布，该底缘型式与美国松原坝底孔闸门底缘型式类似，在原型高达  $125\text{ m}$  水头下试验运行<sup>[6]</sup>，闸门仅出现微小振动，而无空蚀现象。

## 4 结 语

a. 三峡电站排沙底孔工作平板闸门布置在出口收缩段前，经模型试验验证，其水流流态及压力分布较好。闸门全开时，其门槽段水流（下转第 46 页）

①李隆瑞. 有关泄水道通气孔若干水力学问题的探讨. 高速水流情报网第三届全网大会论文集, 1990. 12.

加大城镇生活及工业供水的对策措施全部实施,也只能在现状供水能力 1.154 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  的基础上增加 2900 万  $\text{m}^3$ , 松华坝流域总供水量将达到 1.444 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 此时, 水量利用系数在 0.8 以上, 已接近可利用的最高值, 但所增加的可供水量离昆明市国民经济发展所需增加的水量差距甚远. 根据昆明市城市需水预测, 2010 水平年城市需水量为 4.24 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 2020 水平年为 4.76 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ; 昆明市主城区 2010 水平年缺水 2.04 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 2020 水平年缺水 2.56 亿

$\text{m}^3/\text{a}$ . 因此, 本区水资源无法满足用水要求, 必须从外流域引水济昆来满足昆明市城市及工农业用水需求, 以确保昆明市国民经济的可持续发展. 目前, 昆明市掌鸠河引水工程前期工作已全面启动, 预计大量的优质水将引入昆明, 届时, 昆明市的用水问题有望得以解决, 生态环境有望得以恢复. 同时, 在外流域引水济昆发挥效益之前, 可以有计划地实施上述措施, 将部分缓解昆明市现状用水供需不足的矛盾.

(收稿日期:1999-12-16 编辑 张志琴)

(上接第 32 页)

空化数为 1.73~2.56, 大于该种门槽的初生空化数 0.4~0.6, 安全系数较大. 门槽内涡流及脉动强度不大, 对减免空蚀破坏有利, 然而, 门槽流速为 24~33  $\text{m/s}$ , 高速含沙水流的磨损应引起重视.

b. 根据试验论证, 设置通气孔后, 在闸门启闭过程中, 门后负压由不通气时的 -100 kPa 变化到通气后的 -3.0 kPa. 通气孔尺寸经计算和试验测定, 推荐以  $2 \times \varnothing 80 \text{ cm}$  为宜. 两个通气孔横向布置在门槽后顶板上.

c. 排沙底孔工作门槽采用标准门槽, 选型合理. 闸门底缘型式推荐为: 头部小圆弧半径  $R = 0.2283 \text{ m}$ ,  $R = 0.33 T$ , 倾度  $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$ , 经试验验证无负压产生, 正压分布较好, 无空蚀发生.

d. 闸门全开时, 闸门区水流脉动压强标准差为 2.0~8.0 kPa, 脉动压强系数  $\beta = 0.02 \sim 0.04$ , 脉动主频率为 0.2~2.0 Hz, 闸门启闭过程中, 水流脉动压

强和主频均比闸门全开时大, 脉动压强标准差最大达 45 kPa, 最高主频率为 8.5 Hz, 符合一般规律.

参考文献:

[1] 金泰来. 高坝闸门总体布置[M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
[2] 中国科学院水工研究室译. 高速水流论文译丛(第一册)[C]. 北京: 科学出版社, 1958.  
[3] 尹洪昌. 泄水建筑物的破坏及防治[C]. 东北勘测设计院. 泄水工程与高速水流. 成都: 成都科技大学出版社, 1996.  
[4] 王俊勇. 矩形方角门槽内洲涡的水力特性研究[J]. 高速水流, 1987.  
[5] 夏毓常. 水力计算论文[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 171~172.  
[6] T·H 杜马. 关于水工建筑物振动的实际经验[C]. 长江科学院选译. 高速水流译文集. 北京: 水利电力出版社, 1979. 275~277. (收稿日期 2000-02-20 编辑 张志琴)