

高尾矿坝塔式进口竖井排洪道的泄流能力

河海大学 王世夏

介绍了用于高尾矿坝的具有圆形框架式进水塔的竖井排洪道泄流能力模型试验研究。基于大量试验实测资料,考查了影响泄流能力的几何边界条件和水力因素,给出了这种排洪道以环形堰流、孔流、孔堰多层流以及有压管流等各种流态运行时泄流能力计算公式。

关键词 高尾矿坝 竖井排洪道 圆形框架式进水塔 泄流能力

Discharge Capacity of Shaft Spillway with Framed Inlet Tower for High Tailings Dam

Wang Shixia

The discharge capacity of shaft spillway with framed inlet tower used for high tailings dam is studied by physical model. According to the model tests and measured data, the boundary conditions and the hydraulic factors affecting discharge capacity are analyzed. By means of statistical analysis, a series of formulae to calculate discharge capacity of flow pattern such as ring weir flow, ring orifice flow, multiple-layer flow of ring weir and ring orifices and pressure pipe flow are proposed.

作为高尾矿坝的泄洪设施,我国冶金矿山目前多采用一种具有框架塔式进口的竖井排洪道。这种高水头泄水建筑物一般由圆形框架式进水塔、带喇叭口的圆断面竖井和圆断面出水隧洞三部分组成。这种排洪道与水利工程中传统的竖井溢洪道相比,在建筑物的轮廓形态、运行方式和泄流特性等方面都有很大区别,传统的竖井溢洪道进口有固定的坎顶高程,无论是用曲线实用堰或斜面宽顶堰,无论堰上是否设闸门,都以环形堰方式进水。而高尾矿坝的竖井排洪道的进水塔是由一系列轴对称分布的立柱和不等高间距分布的水平圈梁所构成,梁柱交错围成的多层、多孔分布于不同高程,并随着尾矿坝的升高不断封堵下层孔,启用上层孔而改变着进水坎顶高程。传统的竖井溢洪道泄流特性一般以环形堰流控制泄流能力作为正常设计工况,并以自进口至出口的全程有压流作为最大泄流能力的校核工况,而高尾坝的竖井排洪道,随运行水位和进水坎顶高程的不同,仅就进

塔水流流态而言,即有环形堰流、孔流、孔堰双层流、多层流之分,井洞内流态则既可为有压流,更多为无压流,后者还常伴有强烈掺气,从而有抗空蚀的效果。

由于上述竖井排洪道流态的复杂性,以往又无成熟的研究成果,故工程单位建设这种排洪道主要靠经验,缺乏一套水力设计方法可循。本研究以太钢峨口铁矿尾矿坝泄洪系统中上述型式的排洪道为典型(图1),对其运行流态、泄流能力、压强分布与空蚀可能以及井下消能情况进行了全面、系统的模型试验研究。该排洪道自进水塔顶至隧洞出口的最大工作水头超过150m,模型几何比例尺选为1:52.5,用有机玻璃精工制成,同时满足了水流重力相似和阻力相似的要求。模型研究成果不仅用于峨口铁矿,基于大量实测资料分析所得水力特性定量规律,对其它类似工程也具普遍实用意义。

1 运行工况与实测成果

通常情况下高尾矿坝的竖井排洪道都由进

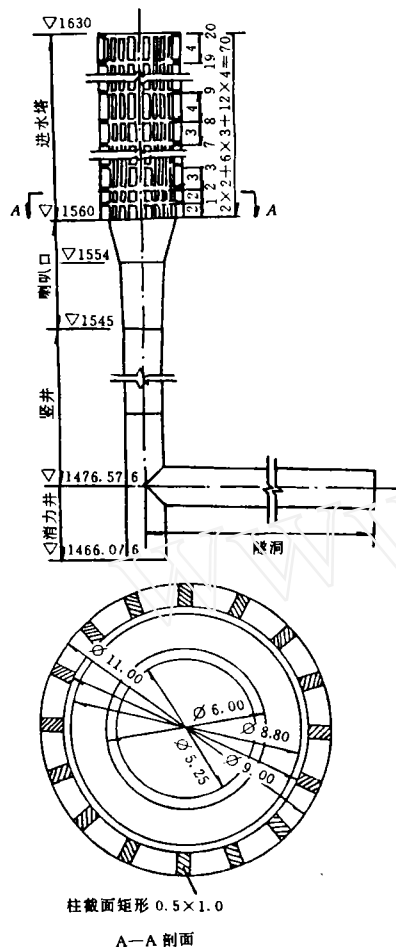


图 1 峨口铁矿尾矿坝的竖井排洪道形态

口框架塔控制其泄流能力。但随着尾矿坝的上升、库水位的抬高以及塔身各层孔自下而上的封堵和启用,还可划分三类典型控制工况:

(1) 低位工况。即以塔周最下层孔口底坎(竖井喇叭口上口)为进水坎顶(图 1 中坎顶高程为 1560m),且该坎顶以上各层孔口均不封堵的各种水头运行工况。

(2) 高位工况。以最上层孔口底坎为进水坎顶(图 1 中其高程为 1626.25m)的运行工况。

(3) 堵板顶过水工况。堵板封孔过程中,某层孔口尚未完全封闭而来洪,不得不以堵板顶为进水坎顶的运行工况(峨口铁矿排洪道试验中典型过水堵板顶高程为 1608.5m)。

根据大量试验观测,峨口铁矿尾矿坝竖井

排洪道在上述三类工况下的泄流能力特性,以原型流量与库水位关系 $Q = f(Z)$ 或流量与进口坎顶水头关系 $Q = f(H)$ 表示的实测成果,共包括 70 组样本数据,反映在图 2~4 中。

这些丰富的资料包含了环形堰流、孔流、孔堰双层流、多层流以及受井、洞控制的有压管流等各种泄流方式。根据上述资料作数据处理和回归分析,以求得普遍实用的泄流能力计算公式。分析将按流态的不同情况,先从高位单纯环形薄壁堰溢流进行分析,获得其堰流流量系数公式,进而考虑低位进水时的堰高修正、堰顶尺寸相对水头不符合薄壁堰条件时的堰型修正;堰流规律掌握后,再由孔堰双层流实测资料分析得孔流部分泄流能力与流量系数,从而以塔本身控制泄流为前提的各种情况下泄流能力公

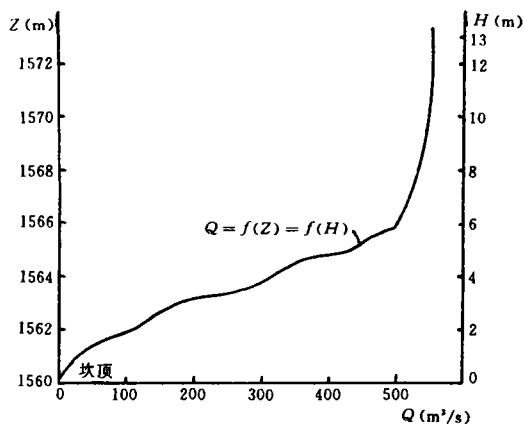


图 2 进水塔低水位运行时实测泄流能力曲线

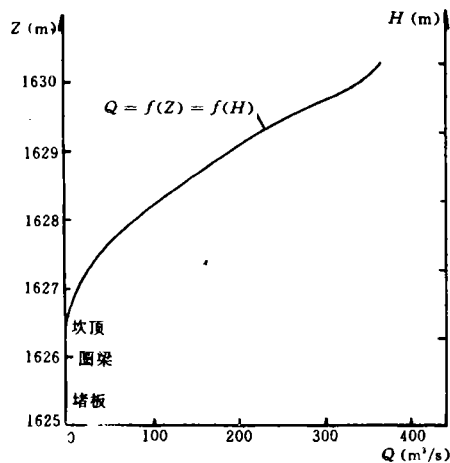


图 3 进水塔高水位运行时实测泄流能力曲线

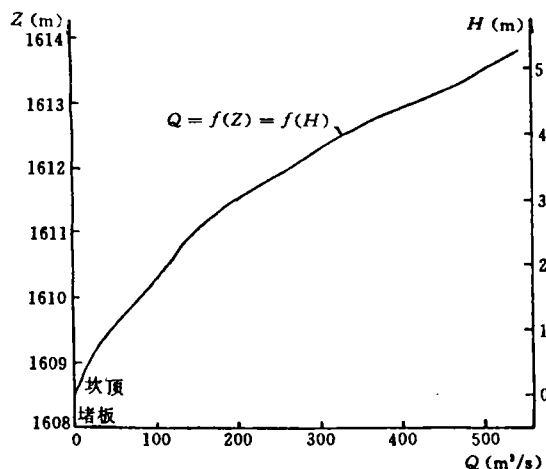


图 4 进水塔堵板顶过水运行时实测泄流能力曲线式都可得到。对于泄流已转变为受竖井、隧洞控制的有压管流情况,也可据实测资料(图 2)求取流量系数和水头损失系数,用以估计这种排洪道的极限泄流能力。

2 进水塔控制的泄流能力

2.1 进水塔环形堰堰流

进水塔环形堰自由堰流公式可一般写成^[1]

$$Q_w = M_w L \sqrt{2g} H_w^{3/2} = M_w (2\pi R - Nt) \sqrt{2g} H_w^{3/2} \quad (1)$$

式中 Q_w —— 环形堰溢流量

H_w —— 库水位与堰顶之间的水头

L —— 净溢流长度, $L = 2\pi R - Nt$

R —— 进水塔外缘半径

N —— 立柱个数

t —— 立柱环向厚度

g —— 重力加速度

M_w —— 环形堰综合流量系数

对于本研究塔型,不妨写下列函数:

$$M_w = f\left(\frac{H_w}{L}, \frac{P}{H_w}, \frac{\delta}{H_w}\right) \quad (2)$$

式中 P —— 堰高,即进水坎顶与塔基的高程差

δ —— 堰顶径向尺寸

已有的试验研究成果表明,堰高 P 对 M_w 的影响发生在 P/H_w 较小时,同时,作为薄壁堰运行的条件是 $\delta/H_w < 0.67$ ^[2],这样, M_w 仅与

H_w/L 有关:

$$M_w = f\left(\frac{H_w}{L}\right) = a + b \cdot \frac{H_w}{L} \quad (3)$$

按实测样本数据回归分析得 $a = 0.22367$, $b = 1.30312$,故高位环形薄壁堰流量系数为

$$M_w = 0.22367 + 1.30312 \cdot \frac{H_w}{L} \quad (4)$$

低位工况的流量系数较高位工况的流量系数大,这是由于前者水流径向汇落竖井所受的阻力较小。在相同 δ 和 H_w 条件下,将两者对比,后者减前者之差设为 ΔM_p , 则 $\Delta M_p = f(P/H_w)$, 根据实测资料进行多项式回归得

$$\Delta M_p = 0.03540 + 0.02359 \cdot \frac{P}{H_w} - 0.00459 \left(\frac{P}{H_w}\right)^2 \quad (5)$$

令 $\Delta M_p = 0$, 解关于 $\frac{P}{H_w}$ 的方程得正根为 6.353, 它反映了框架式进水塔环形堰流计算公式须考虑堰高影响的最大范围,即对于 $P/H_w < 6.353$ 的低位环形堰,流量系数可由高位环形堰流量系数加上式(5)的 ΔM_p 得到; 对于 $P/H_w \geq 6.353$ 的环形堰,则取 $\Delta M_p = 0$ 。

式(5)对 P/H_w 求导并令其为零,可知当 $P/H_w = 2.5697$ 时得 ΔM_p 的最大值为 0.06571, 表明使环形堰运行于 $P/H_w = 2.5697$ 附近,将能得到最大的流量系数。

对 $\delta/H_w < 0.67$ 的环形薄壁堰已作出分析,对 $\delta/H_w \geq 0.67$ 时的流量系数应计及 δ/H_w 的影响。因此,实测流量系数与式(4)或式(5)计算所得流量系数之差设为 ΔM_δ , 则应有 $\Delta M_\delta = f(\delta/H_w - 0.67)$ 。根据实测资料进行非线性回归分析得

$$\Delta M_\delta = -0.06013 \left(\frac{\delta}{H_w} - 0.67\right)^{0.18226} \quad (6)$$

所以,表征框架塔环形堰自由溢流能力的综合流量系数可统一概括为

$$M_w = 0.22367 + 1.30312 \cdot \frac{H_w}{L} + \Delta M_p + \Delta M_\delta \quad (7)$$

$\Delta M_p =$

$$\begin{cases} 0.03540 + 0.02359\left(\frac{P}{H_w}\right) - 0.00459\left(\frac{P}{H_w}\right)^2 & P/H_w < 6.353 \\ 0 & P/H_w \geq 6.353 \end{cases}$$

 $\Delta M_s =$

$$\begin{cases} -0.06013\left(\frac{\delta}{H_w} - 0.67\right)^{0.18226} & \delta/H_w \geq 0.67 \\ 0 & \delta/H_w < 0.67 \end{cases}$$

环形堰的任何自由堰流情况,根据其几何尺寸与运行水头,可用式(7)、(1)求得流量。

2.2 进水塔环形孔流和孔堰多层流

进水塔除以单纯环形堰流方式过水外,还以孔流、孔堰双层流乃至多层流过水。后者流量不妨视为堰流与一层孔流或多层孔流的叠加。

根据水力学理论,进塔孔流过流能力及流量系数应写成下列形式^[2]:

$$Q_0 = \mu_0 L e \sqrt{2gH_0} \quad (8)$$

$$\mu_0 = A + B \cdot \frac{e}{H_0} \quad (9)$$

式中 e —— 孔口垂直净高,即过水坎顶与其上圈梁底面之高差

H_0 —— 孔口高度中点($e/2$)处承受的水头

Q_0 —— 孔流流量

μ_0 —— 流量系数

A, B —— 待定系数

取低位工况和堵板顶过水工况的双层流实测资料(图2、4)进行分析,总流量 $Q = Q_0 + Q_w$,而 Q_w 可按式(7)和(1)算出,则

$$Q_0 = Q - Q_w \quad (10)$$

$$\mu_0 = \frac{Q_0}{Le \sqrt{2gH_0}} \quad (11)$$

由此整理出 μ_0 与 e/H_0 的对应样本数组,进行回归分析求得 $A = 0.92471, B = -0.43662$,从而

$$\mu_0 = 0.92471 - 0.43662\left(\frac{e}{H_0}\right) \quad (12)$$

所以,环形孔堰多层流的流量计算公式为

$$\begin{aligned} Q &= Q_w + \sum Q_{0i} \\ &= M_w L \sqrt{2gH_w}^{3/2} + \sum \mu_{0i} L e_i \sqrt{2gH_{0i}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mu_{0i} = 0.92471 - 0.43662\left(\frac{e_i}{H_{0i}}\right) \quad (14)$$

式中 $\sum Q_{0i}$ —— 各层孔流流量之和

μ_{0i} —— 第 i 层孔流流量系数

e_i —— 第 i 层孔口垂直净高

H_{0i} —— 第 i 层孔口中心水头

3 竖井和隧洞控制的有压管流泄流能力

对受井、洞控制的有压管流泄流情况,实测结果见图2。有压管流泄流能力可写成^[3]

$$Q = \mu_r \omega \sqrt{2gH_p} \quad (15)$$

$\mu_r =$

$$1 / \sqrt{1 + \sum \xi_i \left(\frac{\omega}{\omega_i}\right)^2 + \sum \frac{2gl_i}{C_i^2 R_i} \left(\frac{\omega}{\omega_i}\right)^2} \quad (16)$$

式中 ω —— 出口断面面积

H_p —— 进口上游水位至出口断面中心的总水头(自由出流)

μ_r —— 流量系数

ξ_i —— 某一局部水头损失系数

l_i —— 某一流段长度

ω_i —— 断面面积

R_i —— 水力半径

C_i —— 谢才系数

峨口铁矿尾矿坝水头 H_p 应取上游库水位减去隧洞出口断面中心高程(1476.021m)之差, ω 为隧洞出口断面面积(21.648m²),根据水位 $Z = 1566.5 \sim 1573.335$ m(即 $H_p = 90.479 \sim 97.314$ m)的典型有压流实测资料,可求得 $\mu_r = 0.5660 \sim 0.5833$,对应流量 $Q = 516 \sim 551.454$ m³/s。

在图1所示型式的竖井排洪道中,可将竖井等截面顶端高程(1545m)以上作为进口段,水流经框架塔和喇叭口的全部水头损失作为进口损失,以该顶端断面流速水头的比例数表示,定义为进口水头损失系数 ξ_0 。另外一个局部水头损失发生在竖井与隧洞交接处,该处竖井下部

(下转第47页)

下,力争提高精矿产量。

小型磁选厂一般为一段或两段磨矿、选别流程,这样的流程也可以生产高品位铁精矿,但要处理好质量和产量关系:按较高品位组织生产不一定获得高效益,按较低品位组织生产也不一定获得高效益,特别是不要通过一段细磨来生产较高品位的精矿。

4. 结 语

地方铁矿,尤其是地方小铁矿选矿厂的设计、建设与生产有其自身的特点,邯邢矿山局设计研究院在放马峪选矿厂设计、建设与生产中,深化了对上述几个问题的认识。破碎、筛分作业

作为磨矿作业的前序作业,对保证磨矿、选别作业的生产有很大关系,多碎少磨要通过尽量少的投资和营运费用来实现。过滤系统的配套不仅有技术上的需要,在经济上也证明是可行的。在组织生产过程中,要处理好质量与产量的关系,质量高不一定效益最好,放马峪选厂生产实践表明,当精矿品位大于 66% 时,会使尾矿品位升高,回收率降低,所以放马峪选厂根据 65% 的精矿品位组织生产,通过提高产量来提高经济效益。

(收稿日期 1994 02 23)

(上接第 39 页)

还有消力井,可定义此交接段局部水头损失系数为 ξ_j 。由于竖井以及隧洞各断面都为与隧洞出口断面相同的圆断面 ($d = 5.25\text{m}$),故各断面 $\omega_i = \omega$, $R_i = d/4$ 。按曼宁糙率 $n = 0.0155$,可求各个 $C_i = C$ 或阻力系数 $\lambda = 8g/C^2$,式 (16) 可写成

$$\mu_p = 1/\sqrt{1 + \xi_s + \xi_j + \frac{\lambda}{d}(h + l)} \quad (17)$$

式中 h —— 竖井全高 (83.424m)

l —— 隧洞全长 (69.409m)

上式也可改写成局部水头损失系数之和的表达式

$$\xi_s + \xi_j = \frac{1}{\mu_p^2} - 1 - \frac{\lambda}{d}(h + l) \quad (18)$$

在本项研究中 $\mu_p = 0.5660 \sim 0.5833$, $\lambda = 8g/C^2 = 0.0172$, $d = 5.25\text{m}$, $(h + l) = 157.833\text{m}$,可得: $\xi_s + \xi_j = 1.6208 \sim 1.4384$,平均值为 1.5296,这就是说,以有压管流方式泄水时局部水头损失系数之和可近似取 1.5296,相应 μ_p 平均值为 0.5729。

4. 结 语

(1) 目前多为冶金矿山高尾矿坝泄洪系统采取的框架式进水塔的竖井排洪道有多种运行工况和过水流态,不同状态下的泄流能力应按

不同公式计算,笼统采用环形堰流公式和单一的流量系数是不妥的。

(2) 类似图 1 所示型式的竖井排洪道的合理运行流态应当是:泄流能力控制于进水塔环形堰自由堰流或自由孔堰多层流(塔内水冠不达进水坎顶高程);竖井内为掺气无压流或掺气满流;通过竖井下部消力井的消能以及竖井与隧洞交接处近 90°锐缘转折的强烈偏流作用,隧洞内流态成为有自由水面的掺气无压流。为保证发生上述流态,按本项试验研究,对塔、井、洞轮廓尺寸设计以及建成后运行方式,建议进水塔半径大致与竖井、隧洞的直径相等;井、洞同直径,相交近垂直,但洞内纵坡仍应大于临界坡;消力井可设计成竖井的下延段,深度不小于 $2d$;排洪道泄流运行时应使进水坎顶以上水头小于进水塔半径。

参 考 文 献

- 1 斯里斯基 C M. 高水头水工建筑物的水力计算. 北京:水利电力出版社,1984:226
- 2 武汉水利电力学院. 水力计算手册. 北京:水利出版社,1980:116~164
- 3 华东水利学院. 水工设计手册,第六卷. 北京:水利电力出版社,1987:240~241

(收稿日期 1993 08 04)