

## 材料与设备

## 虹吸管在酸性水库取水工程中的应用

周彩霞<sup>1</sup> 朱学胜<sup>2</sup> 郑伟<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 中铁建铜冠投资有限公司, 安徽 铜陵 244000)

[摘要] 传统的取水方式通常需要消耗电能, 或对地形地质条件要求较高, 产生大量开挖及边坡支护工作, 或管道穿越防渗层造成防渗层失效。虹吸管利用上游水面和管内的压差, 可将水流从上游库高处跨过高地引向低处, 避免管道穿坝破坏防渗层, 是较好的取水方式。某酸性水库拦挡坝坝面及库区均采用 HDPE 土工膜防渗, 为避免破坏防渗系统并节约能源, 设计采用虹吸管进行取水和输水。通过介绍虹吸管输水能力和安装高程的计算, 并进行复核, 确定虹吸管满足工程的要求。

[关键词] 虹吸管; 取水方式; 酸性废水; HDPE 土工膜; 防渗; 输水能力; 安装高程; 能量方程

[中图分类号] X703 [文献标志码] B [文章编号] 1008-5122(2021)03-0078-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.03.020

## Application of Siphon in Acid Reservoir Water Intake Project

ZHOU Cai-xia, ZHU Xue-sheng, ZHENG Wei

**Abstract:** The traditional way of water intake usually consumes electric energy, or requires high terrain and geological conditions, resulting in a large number of excavation and slope support, or pipeline crossing the impervious layer cause the damage of the impervious layer. Using the pressure difference between the upstream water surface and the inner pipe, the siphon can lead the water flow from the upstream, across the highland to the downstream, and avoid the pipeline crossing the dam to destroy the anti-seepage layer. It was a better way to take water. HDPE geomembrane was used to prevent seepage on the dam surface and reservoir area of an acidic reservoir. In order to avoid damaging the seepage control system and save energy, siphon pipes were designed for water intake and transmission. By introducing the calculation of water conveyance capacity and installation elevation of siphon pipe, and accounting data, it was concluded that the siphon pipe meet the requirements of the project.

**Key words:** siphon; water intake method; acid waste water; HDPE geomembrane; anti-seepage; water conveyance capacity; install elevation; energy equation

## 0 前言

含硫金属矿山在开采过程中, 在空气、水、微生物

等物质的作用下会发生一系列物理化学反应, 形成含大量重金属离子的酸性水, 对周边环境造成巨大威胁<sup>[1]</sup>。酸性水的收集与处理是目前很多金属矿山面临的难题, 露天采场及废石堆场产生的酸性水通常采用酸性水库的形式收集和临时储存, 并通过库内取水设施输送至水处理系统或者综合利用系统进行处理或者再利用。

酸性水库的防渗通常采用全库水平防渗、垂直防渗或者联合防渗的形式, 大多数采用 HDPE 土工膜全库水平防渗的形式。

[收稿日期] 2021-02-02

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2017YFC0804600)

[作者简介] 周彩霞(1986—), 女, 山西吕梁人, 硕士, 工程师, 主要从事尾矿工程设计及研究工作。

[引用格式] 周彩霞, 朱学胜, 郑伟. 虹吸管在酸性水库取水工程中的应用[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(3): 78-82.

酸性水库的传统取水方式有岸边泵站式、库内浮船式、“井-管-库外泵站”式。传统的取水方式通常需要消耗电能,或者对地形地质条件要求较高,容易产生大量开挖及边坡支护工作,有的穿越防渗层造成防渗层失效。在坝高较低、库内水位变幅较小的情况下,采用虹吸管取水可以避免传统取水方式的缺点,避免管道穿过防渗层,工程量小,节约能源,运行管理便捷。

本文结合某矿山酸性水库实例,将虹吸管应用于该酸性水库取水工程中,介绍了虹吸管取水的布置方式、水力计算方法以及实施效果,供同类工程借鉴。

## 1 酸性水库取水方式

### 1.1 传统取水方式

在实际工程中,根据取水量、地形、地质、施工、运行管理等条件的不同,传统的酸性水库取水方式包括岸边泵站式、库内浮船取水、“井-管-库外泵站”式。

#### 1.1.1 岸边泵站式

在岸边设置泵站吸水,优点是取水水量及扬程可以通过水泵来控制,缺点是消耗电能,且泵站受地形条件影响,容易产生大量开挖及边坡支护工作;同时由于受水泵吸上高度和安装位置的限制,该方式适用于岸边有足够水深、库内水位变幅小的情况。

#### 1.1.2 库内浮船取水

在库内设浮船泵站的方式取水灵活,适用于库内水位变幅大,但水位涨落速度低,水流不急,冬季无冰凌,停泊条件良好的情况。浮船取水的方式可较好地适应库内水位变化,但船体需要进行防腐处理,维护检修较频繁,也需要消耗电能。

#### 1.1.3 “井-管-库外泵站”式

该方式在库内设取水井,且取水井底部需要设置通向坝外的排水涵管。该方式可充分利用库内水头,较好地适应库内水位变化,但坝底排水涵管对坝底部的工程地质条件要求较高,且不易检修,造价较高;此外穿越坝体防渗层的施工较为困难,容易造成穿膜处防渗体失效而导致渗漏。

### 1.2 虹吸管取水

虹吸管的原理是在虹吸管内部形成真空,利用上游水面的大气压强和虹吸管内部压强之差,将水流从上游库内最高处引向低处。虹吸管的优点是能跨越高地,避免了管道穿坝时破坏坝体防渗层,开挖量少,设备少,运行费低,管理方便。由于受虹吸管允

许真空值的限制,虹吸管取水适用于坝高较低、库内水位变化范围较小的条件。

## 2 虹吸管取水的水力计算

### 2.1 虹吸管的输水能力计算

虹吸管是一种压力输水管道,长度一般不大,按短管计算。当不计行近流速影响,管道出口为淹没出流时,虹吸管的输水量计算方法<sup>[2-4]</sup>如下:

$$Q = \mu_c A \sqrt{2gz} \quad (1)$$

$$\text{其中,} \quad \mu_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (4)$$

式中: $Q$ ——流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\mu_c$ ——管道系统的流量系数;

$A$ ——管道的过水断面面积, $\text{m}^2$ ;

$z$ ——上游和下游的水位差, $\text{m}$ ;

$\lambda$ ——沿程阻力系数;

$d$ ——管道直径, $\text{m}$ ;

$l$ ——虹吸管长度, $\text{m}$ ;

$\zeta$ ——局部水头损失系数;

$C$ ——谢齐系数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ;

$n$ ——粗糙系数;

$R$ ——水力半径, $\text{m}$ ;圆管满流时, $R = \frac{d}{4}$ 。

### 2.2 安装高程计算

虹吸管最大真空值一般出现在管道最高点,如图1所示的外坡坝顶弯头前的B断面处。

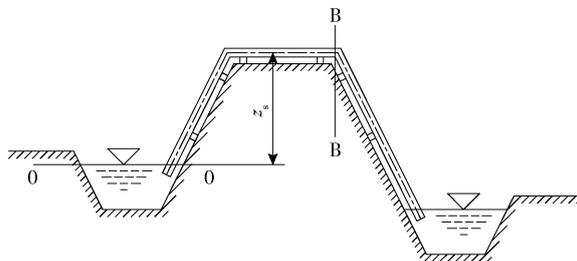


图1 虹吸管示意图

对库内上游水面断面0—0和坝顶弯头前B—B断面列能量方程<sup>[2]</sup>,得到:

$$0 + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = z_s + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中： $l_B$ ——从虹吸管进口至 B—B 断面的长度，m；

$z_s$ ——虹吸管最高点与上游水面的高差，m；

$p_a$ ——断面 0—0 处的大气压强，Pa；

$p_B$ ——断面 B—B 处的压强，Pa；

$v_0$ ——断面 0—0 处的流速，m/s；

$v$ ——断面 B—B 处的流速，m/s；

$\alpha_1$ 、 $\alpha$ ——断面 0—0 处和断面 B—B 处的动能修正系数，通常取  $\alpha_1 = \alpha = 1$ ；

$\rho$ ——密度，kg/m<sup>3</sup>；

$g$ ——重力加速度，m/s<sup>2</sup>。

取  $\frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = 0$ ，则(5)式可简化为：

$$\frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_B}{\rho g} = z_s + \left(1 + \lambda \frac{l_B}{d} + \sum \zeta\right) \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

从理论上讲，虹吸管的顶部真空值  $\left(\frac{p_{ab}}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} -$

$\frac{p_B}{\rho g}$ ) 不能大于最高允许真空值(约 10 m 水柱高度)<sup>[5]</sup>，但是当虹吸管内的绝对压强  $p_{ab}$  小于汽化压强时，液体将会汽化，在虹吸管顶部形成气泡，出现空化现象，使虹吸管无法正常工作。在实际应用中，为确保虹吸管内不产生空化现象，最低压强水头为 2~3 m 水柱，相应的最大允许真空值  $h_v$  与当地大气压有关<sup>[6]</sup>。在常温条件下，当地大气压约为 10 m 水柱时，最大允许真空值  $h_v$  为 7~8 m 水柱，则：

$$\frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_B}{\rho g} \leq h_v \quad (7)$$

$$z_s \leq h_v - \left(1 + \lambda \frac{l_B}{d} + \sum \zeta\right) \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

根据  $z_s$  的最大值和上游最低水位，即可确定虹吸管的极限安装高程。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

某矿山酸性水库用于收集排土场产生的酸性废水，其拦挡坝为土石坝，坝高 13 m，坝顶标高 1 140 m，1 133 m 标高处有一锚固平台，上游坝面及库区均采用 HDPE 土工膜防渗。拦挡坝下游设有酸性水处理系统结合池，需将库内酸性水引入该结合池中，进而对酸性水进行处理。酸性水处理系统要求输水能力不小于 400 m<sup>3</sup>/h。

考虑到本工程坝高较低，库内水位变幅小，能满足虹吸管取水条件，同时拦挡坝上游设有防渗层，采用虹吸管取水可以避免管道穿坝处防渗层破坏引发的渗漏。

初步选择采用耐腐蚀性较好的 HDPE 管作为虹吸管取水，其规格为外径 315 mm，壁厚 18.7 mm。

### 3.2 虹吸管布置及配套设施

虹吸管取水端布置在锚固平台上，进水口标高为 1 133.00 m，出水端伸入水处理系统结合池，结合池最高水位标高为 1 131.00 m，考虑淹没出流。设计虹吸管最高点安装高程为 1 138.90 m，高于正常蓄水位 1 138.00 m，可避免管道穿越防渗层引起的渗漏破坏。另外，在虹吸管进水口处设置底阀和钢筋混凝土支撑槽，在上游管道底部和顶部设袋装土支撑和控制管道位移，在下游管道设管墩，在拦挡坝高点设置真空泵，在下游管道末端设置蝶阀。虹吸管布置如图 2 所示。

虹吸管的操作管理简便，当酸性水库水位超过 1 133.00 m 时，即可开启虹吸管进行输水。启动虹吸管时，首先关闭下游蝶阀，并利用真空泵将虹吸管内抽成真空，待库内水进入管道后适时关闭真空泵，并打开下游蝶阀。

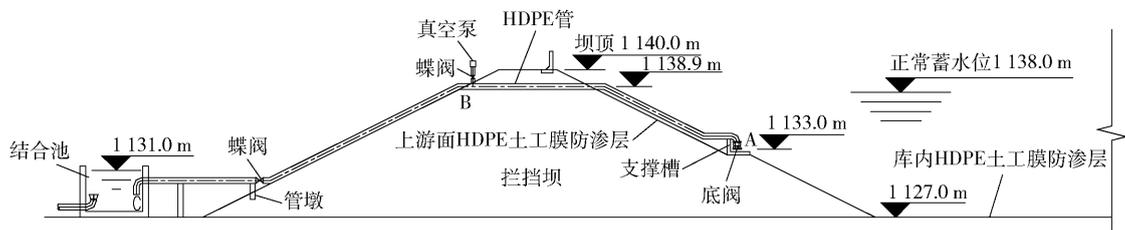


图 2 虹吸管布置图

### 3.3 虹吸管水力复核

根据式(1)~(8)，计算不同上游、下游水位条件下虹吸管的输水量和允许最高安装高程，结果见表 1~表 2。

根据表 1、表 2 的计算结果，本工程虹吸管的输

水能力为 0.119~0.253 m<sup>3</sup>/s(即 428~910 m<sup>3</sup>/h)，满足工程输水能力不小于 400 m<sup>3</sup>/h 的要求；虹吸管的极限安装高程为 1 138.96 m，高于设计安装高程 1 138.90 m，满足虹吸管的水力要求。

表1 下游水位为1129 m时虹吸管的水力复核表

计算参数	水位1	水位2	水位3	水位4	水位5	水位6
上游水位/m	1 133	1 134	1 135	1 136	1 137	1 138
管道直径 $d/m$	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6
粗糙系数 $n$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
虹吸管进口 $A$ 至下游 $C$ 点之间的长度 $l_{AC}/m$	65	65	65	65	65	65
$A$ 和 $C$ 之间的局部水头损失系数 $\sum \zeta_{AC}$	3.691	3.691	3.691	3.691	3.691	3.691
虹吸管进口 $A$ 至 $B$ 点之间的长度 $l_{AB}/m$	26	26	26	26	26	26
$A$ 和 $B$ 之间的水头损失系数 $\sum \zeta_{AB}$	1.596	1.596	1.596	1.596	1.596	1.596
允许真空值 $h_v/m$	8	8	8	8	8	8
上游和下游之间的水位差 $z_s/m$	4	5	6	7	8	9
管道的过水断面面积 $A/m^2$	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
水力半径 $R/m$	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
谢齐系数 $C/m^{1/2} \cdot s^{-1}$	53.42	53.42	53.42	53.42	53.42	53.42
沿程阻力系数 $\lambda$	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5
管道系统的流量系数 $\mu_c$	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2
输水量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	0.168	0.188	0.206	0.223	0.238	0.253
流速 $v/m \cdot s^{-1}$	2.78	3.11	3.41	3.68	3.94	4.18
虹吸管最高点与上游水面的最大高差 $z_{smax}/m$	5.96	5.45	4.94	4.43	3.92	3.41
最高安装高程/m	1 138.96	1 139.45	1 139.94	1 140.43	1 140.92	1 141.41

表2 下游水位为1131 m时虹吸管的水力复核表

计算参数	水位1	水位2	水位3	水位4	水位5	水位6
上游水位/m	1 133	1 134	1 135	1 136	1 137	1 138
管道直径 $d/m$	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6	0.277 6
粗糙系数 $n$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
虹吸管进口 $A$ 至下游 $C$ 点之间的长度 $l_{AC}/m$	65	65	65	65	65	65
$A$ 和 $C$ 之间的水头损失系数 $\sum \zeta_{AC}$	3.691	3.691	3.691	3.691	3.691	3.691
虹吸管进口 $A$ 至 $B$ 点之间的长度 $l_{AB}/m$	26	26	26	26	26	26
$A$ 和 $B$ 之间的水头损失系数 $\sum \zeta_{AB}$	1.596	1.596	1.596	1.596	1.596	1.596
允许真空值 $h_v/m$	8	8	8	8	8	8
上游和下游之间的水位差 $z_s/m$	2	3	4	5	6	7
管道的过水断面面积 $A/m^2$	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
水力半径 $R/m$	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
谢齐系数 $C/m^{1/2} \cdot s^{-1}$	53.42	53.42	53.42	53.42	53.42	53.42
沿程阻力系数 $\lambda$	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5	0.027 5
管道系统的流量系数 $\mu_c$	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2	0.314 2
输水量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	0.119	0.146	0.168	0.188	0.206	0.223
流速 $v/m \cdot s^{-1}$	1.97	2.41	2.78	3.11	3.41	3.68
虹吸管最高点与上游水面的最大高差 $z_{smax}/m$	6.98	6.47	5.96	5.45	4.94	4.43
最高安装高程/m	1 139.98	1 140.47	1 140.96	1 141.45	1 141.94	1 142.43

## 4 结束语

矿山酸性水库取水输水工程中,若地形标高适宜、坝高较低、库内水位变幅小,可考虑采用虹吸管取水输水,不仅能避免管道破坏防渗层造成的酸性水泄露,还能达到节能、经济、便于管理的效果。本工程已投入运行,效果较好,可以为类似工程提供参考。

### [参考文献]

[1] 廖正家. 大宝山矿业酸性矿山废水的污染与治理技术

研究[J]. 资源再生, 2021(2): 61 - 63.

[2] 吴持恭. 水力学(第3版)上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 168 - 169, 178 - 180.

[3] 洪庆松. 虹吸管在城市取水工程中的应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2014, 35(5): 89 - 91.

[4] 程雪. 破山洞水库输水洞修复工程正虹吸管计算与分析[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(3): 29 - 31.

[5] 王卫平. 小型水库放水设施改造为虹吸管的运用[J]. 水利规划与设计, 2007(3): 68 - 70.

[6] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000: 201.

(上接第 77 页)

备运行稳定,完全满足现场生产,生产的银锭不但质量达到标准要求,而且银锭的表面平整及光亮效果非常好。

石墨模具是该生产线的易损件,生产线上布置 33 套模具,原设计每浇铸 49 t 银锭就需要更换模具。由于实际生产过程中采取保养措施及正确布置氮气保护,实际第一套模具浇铸了 92 t 银锭(原设计模具的使用寿命是 80 次,实际模具浇铸次数超过了 180 次)。每套模具的市场价格约 2 000 元左右,综合考虑其他备品备件的费用,该生产线加工的银锭成本为 0.75 元/kg(不包括电费),而传统浇铸方式成本在 0.95 元/kg 以上。

该生产线运行稳定,故障少,每天 8 h 作业,浇铸

15 kg 标准银锭的实际产能可达 1 200 kg,如果浇铸 30 kg 标准银锭,作业效率更高,产能可超过 1 500 kg。

## 4 结束语

氮气保护熔融银液的新型银锭自动生产线完全满足 15 kg 和 30 kg 标准银锭的生产需要,自动化程度高,作业环境无尘,具有安全、环保、高效等特点。随着工业技术的快速发展,根据国家“十四五”规划和 2035 远景目标,新型银锭自动生产线一定会被贵金属业内认可,具有广阔的发展前景。

### [参考文献]

[1] 黄礼煌. 贵金属提取新技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 7 - 8.