

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220751

# 瓯江引水工程泵站水锤防护研究

董合费<sup>1</sup>, 黄小燕<sup>2</sup>, 王 生<sup>1</sup>

(1. 温州市瓯江引水发展有限公司, 浙江 温州 325000; 2. 浙江珊溪水利水电开发有限公司, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 事故停泵水锤是长距离有压引水工程需要高度重视的技术问题, 针对瓯江引水工程, 以最大扬程下4台水泵事故断电作为控制工况, 单泵事故断电作为验证工况, 开展事故断水电力过渡过程计算分析, 将优化泵出口阀门关闭规律作为主要的水锤防护措施。研究表明, 泵出口蝶阀拒动情况下, 4台水泵同时事故断电工况较单泵事故断电工况管线中压力、流量波动更加剧烈, 水泵反转转速均不满足规范要求; 泵出口蝶阀优化采用两段折线关闭规律, 可以获得较好的水锤防护效果。

**关键词:** 引水工程; 事故断电; 泵站; 阀调节; 水锤防护

**中图分类号:** TV134.1; TV672+.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)02-0137-04

## 1 工程概况

温州市瓯江引水工程输水线路总长约 61 km, 在渡船头设置提水泵站, 自进水前池提水后, 通过有压管道输送至高位的渡垟无压洞, 经长 1.173 km 的无压洞调蓄后, 再转为有压隧洞输水。进水前池最高水位、设计水位、最低水位分别为 5.20、1.05、-2.95 m; 出口无压洞最高水位、设计水位、最低水位分别为 29.51、29.51、20.50 m。在渡船头泵站至渡垟无压洞之间的连接管段, 有压管道总长 0.56 km, 设计平均引水流量 25 m<sup>3</sup>/s, 最大引水流量 50 m<sup>3</sup>/s, 管道直径为 5.0 m, 材质为 Q345R, 糙率取 0.012。泵站安装 5 台立式导叶式混流泵(4 用 1 备), 最大、设计及最小扬程分别为 33.26、29.46、16.50 m, 设计流量为 12.5 m<sup>3</sup>/s, 变频电机额定功率为 4 500 kW, 额定转速为 375 r/min, 变频范围为 30~50 Hz, 水泵和电机的转动惯量  $GD^2$  分别为 1 500、6 500 kg·m<sup>2</sup>, 泵出口设置 DN2600 重锤式液控蝶阀。泵出口阀门关闭规律对水力过渡过程中压力、流量波动影响较大, 优化其关闭规律对水锤防护具有显著效益<sup>[1-3]</sup>。因此, 本文以瓯江引水工程的水力过渡过程为研究对象, 计算分析阀门的关闭规律与水锤防护的作用, 以保障管路及引水工程的安全。

## 2 研究方法

重锤式液控蝶阀的出口阀门过流方程<sup>[4]</sup>为:

$$Q_P = C_d A_G \sqrt{2g \Delta H_P} = \tau (C_r A_r) \sqrt{2g \Delta H_P} \quad (1)$$

式中,  $Q_P$  为断面流量;  $C_d$  为流量系数;  $A_G$  为阀门的公称面积;  $H_P$  为阀门进口压力水头;  $g$  为重力加速度;  $C_r$  为管道特性常数;  $A_r$  为管道截面面积;  $\tau$  为流量系数, 是阀门开度的非线性函数, 一般以离散数据或曲线表示。

考虑到水流瞬变过程中可能改变方向, 可得:

$$Q_P = \frac{C_P - C_M}{R_P + R_M + \Delta H_r |Q_P| / (Q_r \tau)^2} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} C_P &= H_A(t - k\Delta t) - [a/(gA)] Q_A(t - k\Delta t) \\ R_M &= a/(gA) + R |Q_B(t - k\Delta t)| \\ R_P &= a/(gA) + R |Q_A(t - k\Delta t)| \end{aligned}$$

式中,  $\Delta t$  为时间步长;  $k$  为水锤计算管道分段数,  $k=L/\Delta L$ ;  $L$  为管段长度;  $\Delta L$  为水锤计算最小管段长度;  $R$  为水头损失系数。

对式(2)通过叠代求解可得到下一时刻的流量  $Q_P$ 。

## 3 结果与分析

收稿日期: 2022-04-10, 修回日期: 2022-05-19

基金项目: 浙江省水利厅科技计划重大项目(RA1803, RA2011); 国家重点研发计划(2016YFB0502604, 2016YFC0402502)

作者简介: 董合费(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为工程水力学、水工结构, E-mail: 327752391@qq.com

### 3.1 无防护措施事故断电停泵分析

在无任何防护措施的情况下,水泵断电事故可能发生极端水力瞬变过程,主要关注4台泵同时断电对泵段输水系统稳定性的影响,包括流量变化、压力脉动冲击等现象。同时对单泵事故停机时,无防护情况下事故泵与正常运行的3台泵的相互干涉,重点关注事故泵的过泵流量变化、水泵转速变化,作为验证工况。

#### 3.1.1 单泵事故断电分析

图1为单泵断电(其他泵正常运行)事故发生后,泵站至无压洞段的测压管水头分布和压力分布。由图1可发现,单泵断电时,整个管线的压力波动更小,系统最大压力为36.72 m,最小压力为3.1 m,系统水力瞬变现象更加缓和。

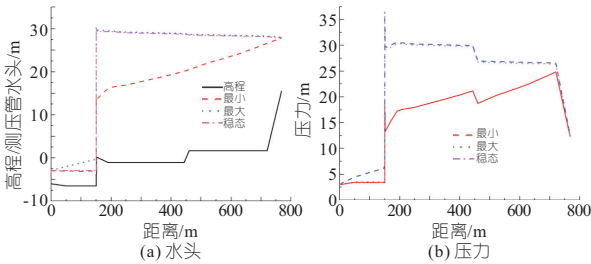


图1 泵站进口至无压洞测压管水头及压力分布(单泵事故)  
Fig. 1 Head and pressure distribution from pump station inlet to free-flow tunnel during single pump trip

图2为断电事故发生后,事故泵的流量、输水

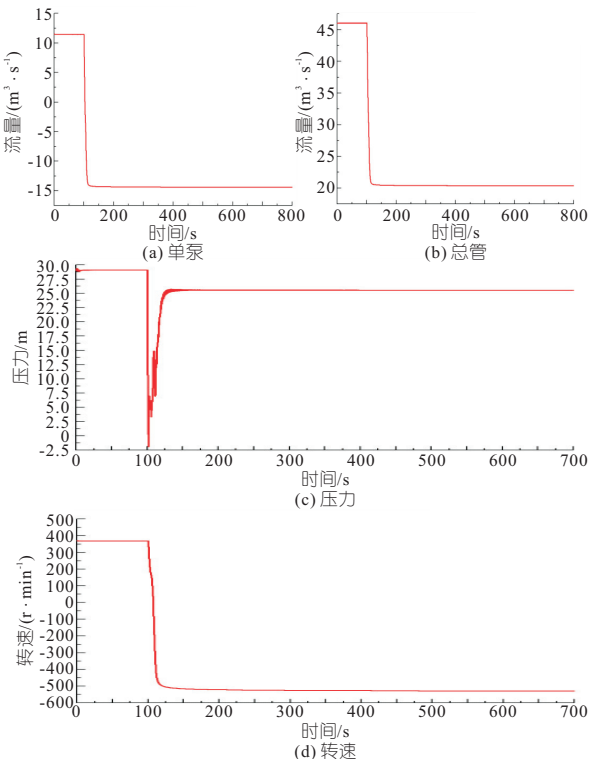


图2 单泵断电事故时单泵、总管流量及泵后压力和水泵转速变化

Fig. 2 Flow change of single pump and main pipe and pump head and speed change during single pump trip

总管的流量、泵后压力及事故泵的转速这4个变量随时间的变化情况。

由图2可知,单泵发生断电事故时,事故泵的过流量由正转负的时刻为3.0 s,倒流流量增大到 $-13.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 用时7.9 s,最终稳定在 $-14.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 。事故泵转速由正转负的时刻为7.2 s,反向转速达到465 r/min用时5.9 s,反转转速最终稳定在 $-530 \text{ r}/\text{min}$ ,为额定转速的1.43倍。

#### 3.1.2 4台泵事故断电停泵分析

分析泵站4台水泵发生事故掉电,而泵后阀门拒动的水力瞬变现象。在水泵正常运行100 s后,发生断电事故,整个泵站至无压洞管线的测压管水头及压力分布见图3。

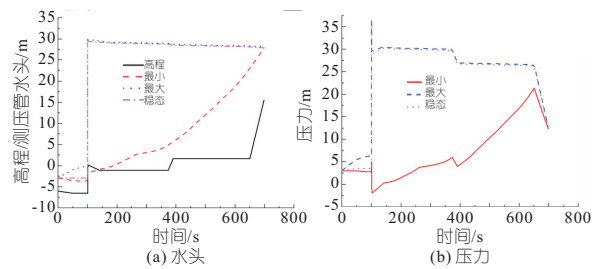


图3 泵站进口至无压洞测压管水头及压力分布(4台泵事故)  
Fig. 3 Head and pressure distribution of piezometric pipe from pump station to free-flow tunnel during four pumps trip

由图3可看出,由于事故停泵,泵前水位和压力发生了波动,这是由于突然停泵在前池产生了水涌现象。而整个泵站的压力位于泵前,压力为36.77 m,最小压力发生在泵后,最小压力为 $-1.93 \text{ m}$ ,原因是流量突然减少造成的。图4为事故掉电时流量随时间的变化曲线。由图4可发现,事故断电发生后,过泵流量从 $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 降到0仅用时6.6 s,水流倒流过程中从0至 $13.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 用时14.5 s,之后流量变化减缓,最终稳定在 $-13.83 \text{ m}^3/\text{s}$ ,共用时约450 s。总管流量变化曲线基本

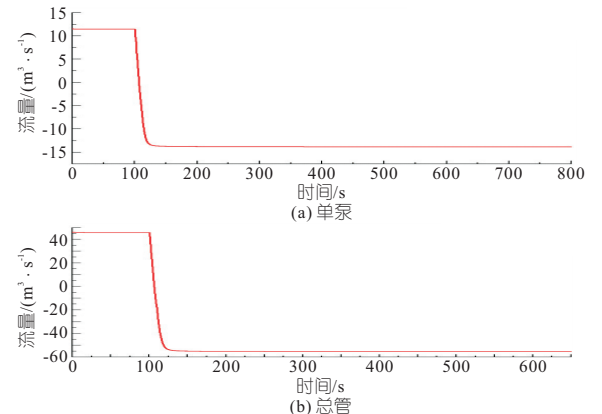


图4 4台泵事故掉电时单泵及总管流量变化  
Fig. 4 Flow changes of single pump and main pipe during four pumps trip

与过泵流量变化规律一致, 最终总管倒流流量稳定在  $-55.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

事故断电时水泵转速的变化规律与流量变化规律基本一致(图 5), 都是先迅速下降, 然后缓慢

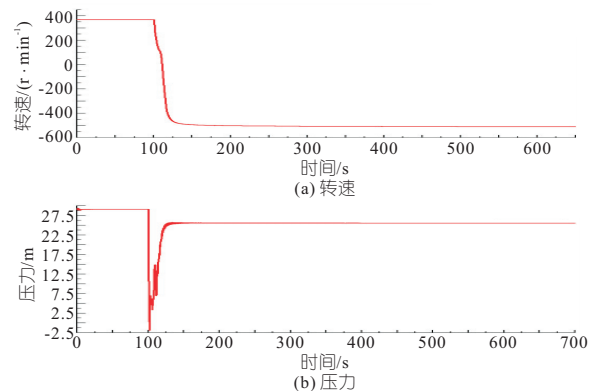


图 5 4 台断电事故时泵后压力及水泵转速变化

Fig. 5 Pump discharge pressure and speed change during four pumps trip

变化。水泵转速从额定转速  $370 \text{ r/min}$  快速下降到 0, 用时  $11 \text{ s}$ , 从开始倒转到转速达到  $-465 \text{ r/min}$  (额定转速的 1.25 倍) 用时  $14 \text{ s}$ , 最终稳定在  $-510 \text{ r/min}$ , 共用时  $527.6 \text{ s}$ 。由图 5(a) 可看出, 水泵最终的倒转转速是额定转速的 1.38 倍, 不满足《泵站设计规范》(GB50265-2010)<sup>[5]</sup> 要求。由图 5(b) 可知, 当  $100 \text{ s}$  时发生断电事故, 泵后压力因流量突然减少, 压力瞬间降到最小值  $-2.03 \text{ m}$ , 然后压力震荡上升, 在  $150 \text{ s}$  后基本稳定, 稳定压力为  $25.5 \text{ m}$ 。

### 3.2 水泵事故断电防护措施

考虑到工程泵站引水管道系统较短、水泵扬程不高, 管道流速为  $0.76 \sim 2.55 \text{ m/s}$ 。因此, 考虑通过优化泵出口重锤式液控蝶阀关闭规律, 作为水泵过渡过程的主要防护措施。选择最大扬程下单泵事故断电和泵站全部机组事故断电作为水力过渡过程分析的典型工况, 管道最大、最小内水压力、水泵反转转速及反转时间等需满足相关规范<sup>[5]</sup> 要求。

计算时设定水泵机组  $100 \text{ s}$  时发生抽水断电事故, 泵出口重锤式蝶阀两段折线关闭规律为断电后  $10 \text{ s}$  由全开快速关闭至  $25\%$  开度,  $10 \sim 120 \text{ s}$  慢关至  $0$  开度, 总关闭时间  $120 \text{ s}$ 。

#### 3.2.1 单泵事故断电时重锤阀响应

图 6 为单泵事故断电发生后泵站输水管道的测压管水头及压力分布曲线。由图 6 可知, 单泵事故断电时压力波动较小, 负压是由转轮中心至蝶阀的高程差造成的。

图 7 为断电事故时, 事故泵过流量及总管流

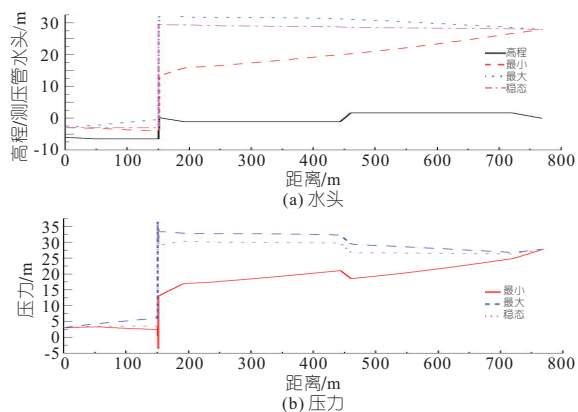


图 6 单泵断电事故时输水管道测压管水头及压力分布  
Fig. 6 Head and pressure distribution of water transmission pipeline during single pump trip

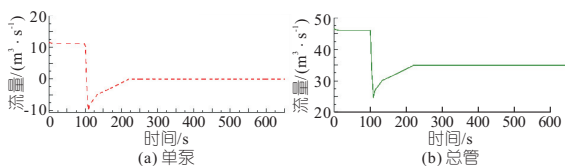


图 7 单泵事故掉电时单泵及总管流量变化  
Fig. 7 Flow changes of single pump and main pipe during single pump trip

量的变化曲线。由图 7 可知, 事故泵的过泵流量变化曲线与 4 台泵同时断电时基本一致。但由于其他 3 台水泵仍保持运行, 泵后压力相对较大, 事故发生后, 事故泵的倒流流量更大, 最大倒流流量为  $-10.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。且由于其他 3 泵的补偿作用, 泵后的总管并未出现倒流, 最小流量为  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , 且随着阀门的关闭, 总管流量逐渐增大, 最后稳定在  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 8 为断电事故发生后, 事故泵重锤阀后的压力变化曲线和事故泵的速度变化曲线。由图 8 可看出, 阀后的最小压力有很大改善, 最小压力为  $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , 同时随着阀门快关, 还产生了小幅度的压力升高。事故泵的转速变化曲线与过泵流量变化曲线一致, 最大反转转速为  $-304 \text{ r/min}$ , 为额定压力的 0.82 倍, 从反转开始到反转转速下降到额定转速  $20\%$  共历时  $89.73 \text{ s}$ 。

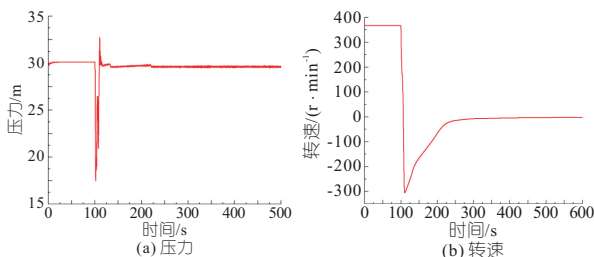


图 8 单泵断电事故时重锤阀后压力及事故泵的速度变化  
Fig. 8 Pressure change behind weight valve and speed change during single pump trip

### 3.2.2 4 泵事故断电时重锤阀响应

图 9 为事故断电发生后泵站及其输水管道的测压管水头分布和压力分布。由图 9 可发现,在水泵前由于事故停泵产生了一个压升,而在水泵与阀门之间产生了负压,这是由转轮中心至蝶阀的高程差造成的。

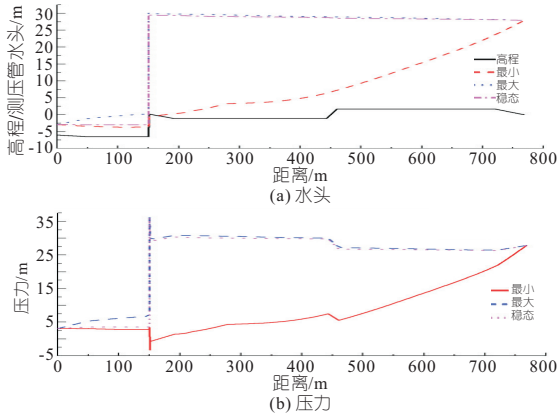


图 9 4 泵断电事故时输水管道测压管水头及压力分布  
Fig. 9 Head and pressure distribution of water transmission pipeline during four pumps trip

图 10(a)为事故发生后,阀后的压力变化曲线,可以发现由于事故断电,泵后压力先降低,后回升,最低压力为 0,当水泵完全关闭

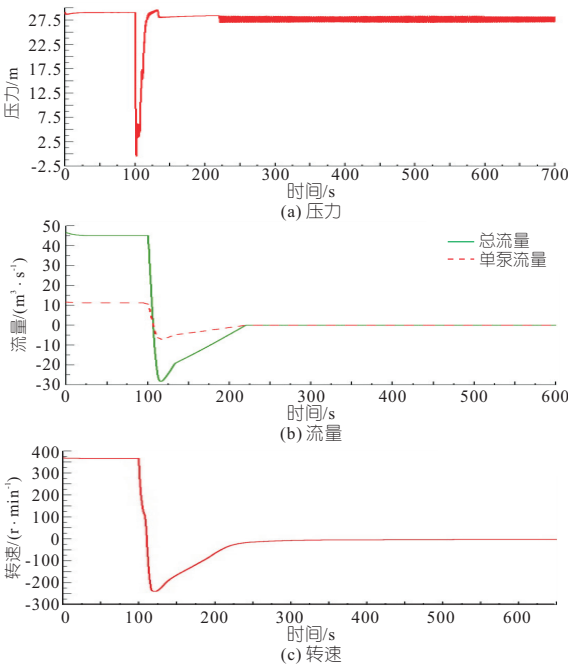


图 10 4 泵断电事故后阀后压力、单泵及总管流量、水泵转速变化曲线  
Fig. 10 Pressure change behind valve, flow change of single pump and main pipe and change curve of pump speed after four pumps trip

(220 s)后,阀后出现了高频低幅值的压力脉动。

图 10(b)为事故断电发生后,事故泵过流量及总管流量的变化曲线。由于事故停泵,过泵流量快速减小并发生倒流,倒流最大流量为  $-7.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ,总管倒流最大流量为  $-28.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ,然后随着泵后重锤阀的快速关闭,流量减小,当阀门进入慢关阶段时,过泵流量也呈现出线性减小的特征,当阀门完全关闭(220 s)后,水泵及管路流量减少至 0。

图 10(c)为事故断电发生后水泵的转速变化曲线。水泵的转速变化曲线基本与过泵流量曲线保持一致,水泵最大倒转转速为  $-239 \text{ r}/\text{min}$ ,为额定转速的 0.65 倍,从水泵开始反转(110.2 s)到转速逐步减小到  $74 \text{ r}/\text{min}$ (额定转速的 20%, 196.0 s),共用时 85.8 s。该工程水泵机组都配置了制动刹车装置,当水泵的转速持续小于额定转速约 20%时,制动装置投入制动,避免了水泵长时间低速反转对机组可能造成的危害。

## 4 结论

泵出口阀门关闭规律是影响有压供水工程水力过渡过程的重要因素,优化其关闭规律是开展水锤防护分析的有效手段,采用“先快后慢”两阶段折线关闭规律,可以有效控制水力过渡过程中管线压力、流量的波动幅值,使管线内水压力、水泵反转转速及反转时间等满足规范要求,是有压供水工程经济可行的水锤防护措施之一。

### 参考文献:

- [1] 张玲. 乌鲁木齐市大西沟管道引水工程水锤防护设计[J]. 水利水电技术, 2016, 47(3): 36-38.
- [2] 郭建平, 邢海仙, 闫黎黎. 大型泵站复杂引水系统过渡过程与关键参数确定[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 27-30.
- [3] 桂绍波, 金德山, 李玲, 等. 滇中引水石鼓水源泵站过渡过程计算研究[J]. 水利规划与设计, 2019(11): 145-150.
- [4] 万五一, 练继建, 李玉柱. 阀门系统的过流特性及其对瞬变过程的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005(9): 1198-1201.
- [5] 中华人民共和国水利部. 泵站设计规范: GB 50265-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [6] 郑源, 张健. 水力机组过渡过程[M]. 北京大学出版社, 2008.

土的配合比为油石比 7.0%、级配指数 0.37、填料含量 13%、再生骨料替代率 50%。试验的改性剂溶液浓度为水玻璃的浓度 10%、硅烷偶联剂的浓度 12%。

b. 水稳定性、热稳定性、渗透试验验证再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性,其水稳定系数均大于 0.9、热稳定系数均小于 4.5、渗透系数均小于  $1 \times 10^{-8}$ ,均满足规范要求。

c. 本文研究结果表明,再生骨料应用于水工沥青混凝土中能够满足规范要求,可为再生骨料水工沥青混凝土在水利工程中的应用提供参考。

参考文献:

[1] 郭艳. 建筑垃圾循环利用道路曲折前景广阔(上) [J]. 资源再生, 2018(1):15-18.

[2] 苏燕,古松,常晓蕾,等. 加热改性再生混凝土粗骨料试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(10):6-10.

[3] 赵海鑫,孙莹. 微波加热改性再生骨料试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019,38(11):3518-3523.

[4] 刘晨,王涛,吴舒逸,等. 再生混凝土骨料强化研究综述[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2021,22

(3):24-28.

[5] WONG YIHKDIEW, SUN DARRENDELAI, LAI DICKSON. Value-added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt[J]. Waste management, 2007, 27(2):294-301.

[6] JULIAN MILLS-BEALE, YOU ZHANPING. The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates[J]. Construction and building materials, 2010, 24(3): 230-235.

[7] 江建国. 双改性再生粗骨料透水沥青混凝土性能研究[D]. 南昌:南昌大学, 2021.

[8] 国家能源局. 水工沥青混凝土试验规程: DL/T5362-2018[S]. 北京:中国电力出版社, 2006.

[9] 张应波,王为标,兰晓,等. 土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适用性研究[J]. 水利学报, 2012,43(4):460-466.

[10] 丁朴荣. 水工沥青混凝土材料选择与配合比设计 [M]北京:水利电力出版社, 1990.

[11] 霍晓宇. 改性剂对再生骨料混凝土力学性能影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.

[12] 中华人民共和国水利部. 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范:SL 501-2010 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.

### Study on Applicability of Recycled Aggregate in Hydraulic Asphalt Concrete

DONG Jing, YU Cheng-yang, LIU Yun-he, QI Yu-jun, CHEN Liang-liang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the applicability of recycled aggregate in hydraulic asphalt concrete, the mix proportion test of recycled aggregate hydraulic asphalt concrete was carried out, and its mix proportion parameters were determined through uniaxial compression, splitting test and permeability (porosity). The asphalt aggregate ratio is 7.0%, the grading index is 0.37, the filler content is 13%, and the replacement rate of recycled aggregate is 50%. The recycled aggregate was modified with modifiers of different concentrations. The water absorption, apparent density, crushing index and adhesion of the recycled aggregate were analyzed to determine the modifier concentration that meets the test requirements. The modifier concentration in this test is 10% of water glass and 12% of silane coupling agent. Based on the above research, the applicability of recycled aggregate in hydraulic asphalt concrete was studied through water stability coefficient, thermal stability coefficient and permeability coefficient. The results show that the application of recycled aggregate in hydraulic asphalt concrete can meet the requirements of the specification, which can provide a reference for the popularization and application of recycled aggregate in hydraulic asphalt concrete.

**Key words:** recycled aggregate; hydraulic asphalt concrete; applicability; mix proportion; modifier

\*\*\*\*\*  
(上接第 140 页)

### Study of Water Hammer Protection for Oujiang River Pumping Station Project

DONG He-fei<sup>1</sup>, HUANG Xiao-yan<sup>2</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>

(1. Wenzhou Ou River Water Diversion Development Co., Ltd, Wenzhou 325000, China;

2. Zhejiang Shanxi Water Conservancy & Hydropower Development Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** Accident pump-stopping water hammer is a technical problem that needs to be highly valued in long-distance pressurized water diversion projects. This paper carried out calculation and analysis of hydraulic transition process on the Oujiang River Diversion Project. The loss of power accident of four pumps under maximum lift was taken as control condition, and the loss of power accident of single pump was taken as verification conditions. The optimization of pump outlet valve closing law was taken as the main water hammer protection measure. The research shows that when the butterfly valve at the outlet of the pump refuses to operate, the pressure and flow in the pipeline fluctuate more violently than that of the single pump during pump trip accident, and the reverse speed of the pump does not meet the specification requirements. By adopting the two-stage broken line closing law of the pump outlet butterfly valve, a better water hammer protection effect can be obtained.

**Key words:** water diversion project; accident power failure; pumping station; valve regulation; water hammer protection