

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221509

再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性研究

董 静, 于成洋, 刘云贺, 齐雨军, 陈亮亮

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性, 对再生骨料水工沥青混凝土进行了配合比试验, 并通过单轴压缩、劈裂试验、防渗性(孔隙率)确定其配合比为油石比 7.0%、级配指数 0.37、填料含量 13%、再生骨料替代率 50%。对再生骨料采用不同浓度的改性剂进行改性, 分析再生骨料的吸水率、表观密度、压碎指标、粘附性, 确定满足试验要求的改性剂浓度为水玻璃的浓度 10%、硅烷偶联剂的浓度 12%。在此基础上通过水稳定系数、热稳定系数、渗透系数研究了再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性。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, 可为再生骨料在水工沥青混凝土中推广应用提供参考。

关键词: 再生骨料; 水工沥青混凝土; 适用性; 配合比; 改性剂

中图分类号: TV441

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0168-05

1 引言

随着我国水利事业的快速发展, 水利工程的旧混凝土建筑物拆除造成大量的建筑垃圾, 这些建筑垃圾乱堆乱放占用了大量的土地, 污染了水源, 也污染了周边环境, 特别是一些有害垃圾对人体的健康造成很大的危害, 亦对人居环境带来不良影响^[1]。因此, 水利工程发展建筑垃圾再生骨料, 推广建筑垃圾在水利工程上的应用, 有利于解决废弃旧混凝土的问题, 便于节约天然骨料资源, 减少废弃混凝土的清运和处理费用。目前对这些废弃水工建筑物的再利用, 常用的方法是利用机械方法转化为再生骨料。苏燕等^[2-4]采用物理、化学方法对经过破碎的再生骨料进行改性试验, 结果表明这些方法对再生骨料表观密度、压碎指标、吸水率等指标均有明显的改善。近年来, 将再生骨料与沥青混凝土结合运用的研究已较多, 如 WONG YIHKDIEW 等^[5]对再生骨料沥青混合料进行了马歇尔试验; JULIAN MILLS-BEALE 等^[6]研究了 25%、35%、50%、75% 比例掺量的再

生骨料沥青混合料的路用性能; 江建国^[7]研究了双改性骨料在道路沥青混凝土中的应用, 反映了再生骨料沥青混合料的路用性能。目前, 将再生骨料用于道路沥青混凝土中的研究已较多, 而将其应用于水工沥青混凝土中极少。因此, 为了能将合理经济运输距离范围内的再生骨料运用于实际水利工程中, 研究再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性非常必要。

2 试验方案

2.1 原材料

水工沥青混凝土是一种多种材料组合而成的复杂分散体系, 其力学性能与其结构性质密不可分, 根据《水工沥青混凝土试验规程》^[8], 选取粗骨料最大粒径为 19 mm。沥青为克拉玛依 70 号。再生骨料物理性能: 表观密度为 2 513.94 kg/m³, 吸水率为 6.21%, 粘附性为 4 级, 压碎指标为 24%。

2.2 试验方案

根据不同原材料特点选择沥青混凝土配合

收稿日期: 2022-07-22, **修回日期:** 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039008); 国家自然科学基金青年基金项目(52109167); 陕西省教育厅专项科研计划项目(21JK0803); 陕西省科技创新团队(2022TD-01); 西安理工大学博士科研启动经费资助项目(451120004)

作者简介: 董静(1990-), 男, 博士、讲师, 研究方向为再生混凝土及水工沥青混凝土性能, E-mail: skydongjing@xaut.edu.cn

通讯作者: 刘云贺(1968-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工结构抗震、沥青混凝土特性, E-mail: liuyunhe1968@163.com

比,采用不同原材料比例、不同级配指数、不同填料含量和油石比组成各种不同配合比^[9],通过防渗性(孔隙率)、强度试验,选择出合适的配合比。级配公式^[10]为:

$$P_i = P_{0.075} + (100 - P_{0.075}) \frac{d_i^r - 0.075^r}{D^r - 0.075^r} \quad (1)$$

式中, P_i 为集料在孔径 d_i 的通过率; $P_{0.075}$ 为填料通过率; D 为集料最大粒径; r 为级配指数。

试验选择了油石比、级配系数、填料含量、替代率四个变量,具体步骤如下。

步骤 1 油石比选择为 6.5%、7.0%、7.5%,根据试验确定油石比的含量。

步骤 2 级配指数选择 0.34、0.37、0.40 三个变量,根据试验确定级配系数。

步骤 3 填料含量选择 11%、13%、15%,根据试验确定填料含量。

步骤 4 再生骨料替代率 0%、25%、50%、75%、100%,根据试验确定再生骨料的替代率。

根据配合比试验方案,试验试件采用标准马歇尔试件,即直径为 100 mm、高为 63.6 mm 的圆柱体,试件制作和试验的加载均在西安理工大学西北旱区生态水利重点实验室进行,根据《水工沥青混凝土试验规程》^[8],孔隙率、劈裂强度、抗压强度的计算公式分别为:

$$p = (1 - \rho / \rho_0) \times 100\% \quad (2)$$

$$R_T = 0.006287P_T/h \quad (3)$$

$$R_C = P_C/A \quad (4)$$

式中, p 为孔隙率; ρ 为试件密度; ρ_0 为最大理论密度; R_T 为劈裂强度; P_T 为劈裂试验最大荷载; h 为试件高度; R_C 为抗压强度; P_C 为抗压试验最大荷载; A 为接触面积。

3 试验结果与分析

3.1 油石比对配合比的影响

选取油石比为 6.5%、7.0%、7.5% 三个变量进行孔隙率、劈裂强度和抗压强度试验,油石比与孔隙率和强度的关系见图 1。由图 1(a)可知,孔隙率随油石比的增加呈递减趋势,但数值均在 2% 以下,满足水工沥青混凝土标准马歇尔试件成型的孔隙率要求^[9]。当油石比从 6.5% 增加到 7.0% 时的孔隙率减幅小于从 7.0% 增加到 7.5% 时孔隙率减幅。由图 1(b)可知,随着油石比的增加,试件中自由沥青的含量增多,集料表面形成一层较厚的自由沥青胶浆,导致其沥青混凝土的强度逐渐减小,油石比从 6.5% 到 7.0% 劈裂强度减

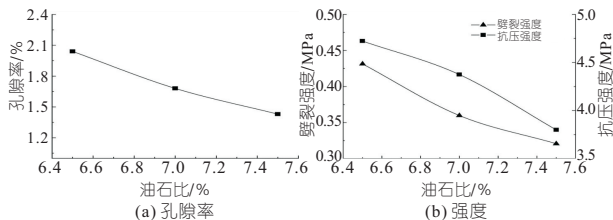


图 1 孔隙率、强度与油石比关系

Fig. 1 Relationship between porosity, strength and asphalt aggregate ratio

幅大于从 7.0% 到 7.5% 的减幅。为更贴合实际情况,因此根据图 1 确定油石比含量为 7.0%。

3.2 级配系数对配合比的影响

试验选取级配指数为 0.34、0.37、0.40 三个变量对沥青混凝土试件进行孔隙率、劈裂强度和抗压强度试验,图 2 为级配指数与孔隙率和强度的关系。由图 2(a)可知,级配指数为 0.34 时孔隙率接近 2%,随着级配指数的变化,孔隙率的变化随级配指数从 0.34 到 0.37 增加而减小,级配指数从 0.37 到 0.40 时孔隙率呈微增的趋势。由于级配指数的增加导致再生骨料沥青混凝土中细骨料含量减小,沥青混凝土试件在进行强度试验时骨料与骨料之间的滑移减小。由图 2(b)可知,随着级配指数的增加,沥青混凝土试件的劈裂强度逐渐增大,其抗压强度逐渐增大。根据图 2 级配指数对沥青混凝土试件的孔隙率和强度的影响,为更贴合实际工程情况,最终确定级配指数为 0.37。

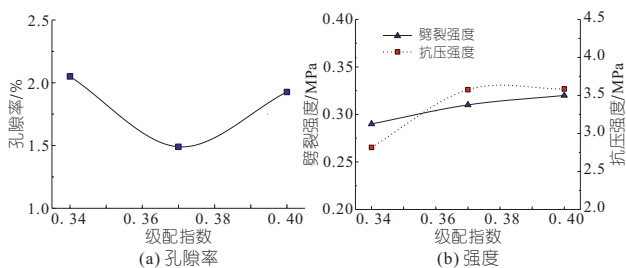


图 2 孔隙率、强度与级配指数关系

Fig. 2 Relationship between porosity, strength and grading index

3.3 填料含量对配合比的影响

油石比为 7.0%、级配指数为 0.37、再生骨料替代率为 100%,试验选取填料含量为 11%、13%、15% 三个变量对沥青混凝土试件进行孔隙率、劈裂强度和抗压强度试验。孔隙率与强度和填料含量关系见图 3。由图 3(a)可知,随着填料含量的变化,油石比一定的情况下,随着填料含量的增加孔隙率呈逐渐递减的趋势,填料含量为 13%、15% 时孔隙率小于 2%。由于填料与沥青在沥青混凝土中组成均匀的沥青胶结料,不仅具有物理吸附,且填料颗粒对于包裹在表面的沥青分子具有一定的化学吸附作用。由图 3(b)可知,

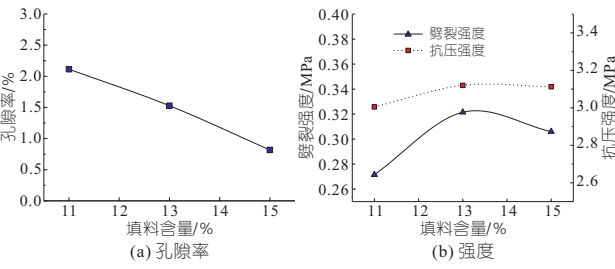


图3 孔隙率、强度与填料含量关系

Fig. 3 Relationship between porosity, strength and filler content

随着填料含量的变化,沥青混凝土的劈裂强度和抗压强度均呈现略微增加趋势且变化不大。综上所述,由图3级配指数对沥青混凝土的孔隙率和强度的影响,确定满足试验要求的填料含量为13%。

3.4 替代率对配合比的影响

油石比为7.0%、级配指数为0.37、填料含量为13%,再生骨料的替代率选取0%、25%、50%、75%、100%进行孔隙率、劈裂强度和抗压强度试验。图4为再生骨料替代率与孔隙率和劈裂强度的关系。由图4(a)可知,孔隙率随再生骨料含量的增加,其孔隙率呈先增加,达到50%后最小,随后替代率达到50%后呈增加趋势。由图4(b)可知,随再生骨料替代率的增加,沥青混凝土的劈裂强度呈先增大后缓慢减小的趋势,抗压强度亦呈先增加后逐渐减小的趋势。其抗压强度、劈裂强度均是在准静态下的试验,试验发生破坏主要是沥青和再生骨料结合部位破坏,再生骨料形状棱角多,一定程度上增加了骨料之间的咬合力,提高了强度。由图4可知,最终确定试验所满足的再生骨料替代率含量为50%。

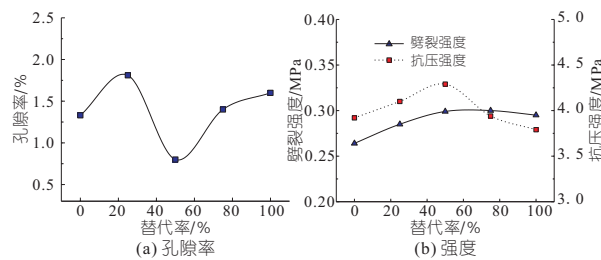


图4 孔隙率、强度与替代率关系

Fig. 4 Relationship between porosity, strength and substitution rate

综上所述,通过分析油石比、级配指数、填料含量及再生骨料替代率对其沥青混凝土试件的孔隙率、劈裂强度和抗压强度的影响,最终选取配合比参数油石比7.0%、级配指数0.37、填料含量13%、再生骨料替代率50%。图5为沥青混凝土骨料级配曲线,表1为沥青混凝土配合比掺量。

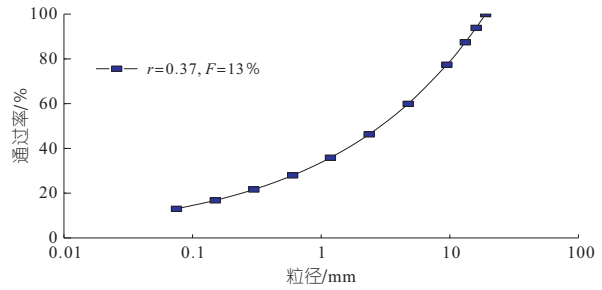


图5 骨料级配曲线

Fig. 5 Aggregate grading curve

表1 沥青混凝土配合比

Tab. 1 Asphalt concrete mix proportion

粒径大小/mm	9.5~19	2.36~9.5	0.6~2.36
含量/%	24.2	31.3	31.5

注:矿粉含量为13%。

4 适用性分析

4.1 不同类型改性剂对再生骨料的影响

试验选取水玻璃、硅烷偶联剂两种改性剂对再生骨料进行改性,根据文献[11]选取水玻璃溶液的浓度为4%、7%、10%,硅烷偶联剂的浓度为8%、12%、16%,通过不同浓度的改性剂对骨料进行浸泡24h,测定骨料的表观密度、吸水率、压碎指标及骨料与沥青的粘附性见图6。

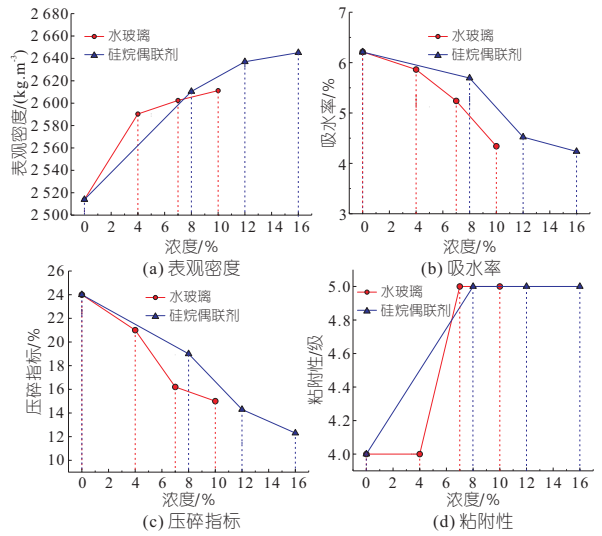


图6 不同类型改性剂对骨料的性能影响

Fig. 6 Effect of different types of modifiers on aggregate performance

由图6(a)可知,未经处理的再生骨料的表观密度为2513.94 kg/m³,对骨料进行不同改性剂进行浸泡,不同类型的改性剂对骨料的表观密度呈递增的趋势,随着溶液浓度的增加表观密度亦随之增加。由图6(b)可知,未经处理的再生骨料的吸水率为6.21%,随着改性剂溶液浓度的增

加,骨料的吸水率呈减小趋势,骨料吸水率与未改性骨料吸水率相比更符合《水工沥青混凝土试验规程》规范^[8]。由图 6(c)可知,骨料在未经改性剂处理时其压碎指标为 24%,对骨料不同类型的改性剂进行改性,骨料压碎指标随溶液浓度的增加而增加,其压碎指标逐渐减小随后趋于平缓。由图 6(d)可知,骨料未加改性的情况下其粘附性等级为 4 级,对骨料进行不同类型的改性剂改性,骨料的粘附性提高到 5 级,满足规范要求^[8]。综上所述,再生骨料经过水玻璃和硅烷偶联剂两种改性剂改性后,骨料的性能明显得到改善。

图 7 为两种不同类型的改性剂混合对再生骨料的性能影响,试验选取水玻璃的浓度分别为 7%、10%,相应硅烷偶联剂的浓度分别为 8%、12%。由图 7 可知,硅酸钠改性剂可对骨料表面孔洞、裂缝进行填充,增强其结构强度;硅烷溶液可在骨料表面包裹形成憎水膜,有效减小再生骨料的吸水率,因此经过两种不同改性剂浸泡处理后,骨料表面裂隙被改性剂反应物填充形成一层保护层,可改善再生骨料的性能。

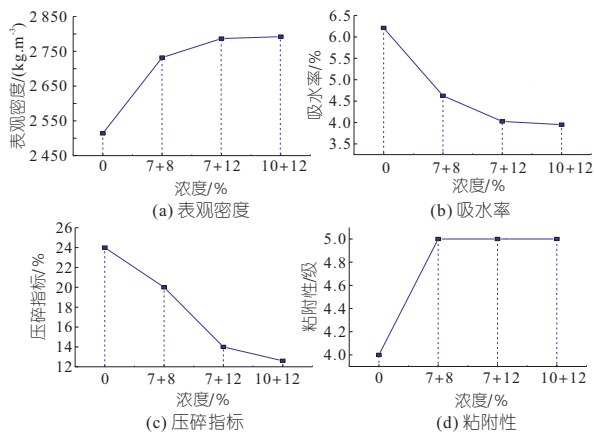


图 7 两种改性剂混合对骨料的性能影响

Fig. 7 Effect of mixing of two modifiers on aggregate performance

图 8 为改性后再生骨料的表面结构。再生骨料经过单一改性剂和两种改性剂混合后的结果对比,两种混合改性剂对再生骨料的表观密度、吸水率、压碎指标、粘附性的改性效果较优。最终选择满足试验的改性剂浓度为水玻璃浓度 10%、硅烷偶联剂浓度 12%。



图 8 改性再生骨料的表面结构

Fig. 8 Surface structure of modified regenerated aggregate

4.2 再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性

沥青混凝土主要用于水利水电工程的防渗结构中,再生骨料用于水工沥青混凝土应具有良好的防渗性,因此通过研究其再生骨料沥青混凝土的水稳定性、热稳定性和渗透试验验证再生骨料在水工沥青混凝土中的适用性。水稳定系数、热稳定系数、渗透系数根据规范^[12]确定。

根据《水工沥青混凝土试验规程》^[8],再生骨料水工沥青混凝土热稳定系数、水稳定系数公式分别为:

$$K_r = R_{20} / R_{50} \quad (5)$$

$$K_w = R_2 / R_1 \quad (6)$$

式中, R_{20} 为 20 °C 下试件抗压强度; R_{50} 为水浴养护试件的抗压强度; R_2 为水浴养护试件的抗压强度; R_1 为空气中试件抗压强度。

图 9 为水工沥青混凝土稳定性系数,由于再生骨料本身的缺陷,经过改性的再生骨料可改善骨料的性能。由图 9 可知,水工沥青混凝土水稳定系数,天然骨料沥青混凝土水稳定系数要小于再生骨料的沥青混凝土水稳定系数。三类骨料的水稳定系数关系为再生骨料>改性再生骨料>天然骨料,且均大于 0.9,具有较好的水稳定性能。三类骨料的热稳定系数为天然骨料>改性再生骨料>再生骨料,均小于 4.5。综上所述,其稳定性均能满足《水工沥青混凝土试验规程》^[8]的要求。

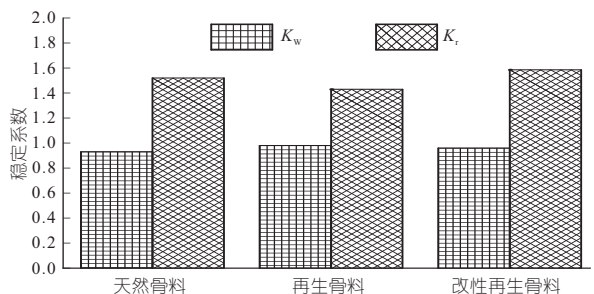


图 9 稳定性系数

Fig. 9 Stability coefficient

通过对再生骨料水工沥青混凝土进行渗透试验,按照一定比例掺量再生骨料、改性再生骨料水工沥青混凝土的渗透系数均在 1×10^{-8} 以下,满足《水工沥青混凝土试验规程》^[8]的渗透性要求。表明再生骨料水工沥青混凝土运用到水利工程中的防渗性要求能够得到保证。

综上所述,通过对水稳定试验、热稳定试验及渗透试验结果分析可知,再生骨料运用到水工沥青混凝土中的各项性能指标满足规范^[8]要求。

5 结论

a. 配合比试验确定再生骨料水工沥青混凝土

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 1×10^{-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-fei¹, HUANG Xiao-yan², WANG Sheng¹

(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