

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222243

大型立式轴流泵装置泵工况及反向发电工况流道优化

胡言馨¹, 张新春², 蔡志洲³, 刘卫东¹, 阚 阚¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020; 3. 国家核电上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要: 泵装置是泵站的核心, 开展泵装置优化研究非常重要。以轴向速度均匀度和速度加权平均角作为优化目标, 实现对某大型立式轴流泵装置进出水流道在泵模式和反向发电模式下的全工况水力性能优化。通过对立式轴流泵装置的进出水流道进行多方案建模, 在不改变进水流道起始面和出口断面形状的条件下, 改变进出水流道弯肘段各个断面的尺寸及外侧型线, 选取了不同进水流道和不同出水流道进行数值模拟结果的对比分析。细致分析了流道在泵模式和反向发电模式下叶轮进出口截面的流速分布均匀度、加权速度平均角度及进出水流道的水力损失、轴流泵装置外特性性能等指标的变化规律。研究成果表明, 在泵站泵装置设计阶段, 可以综合考虑进行流道在泵工况和反向发电工况下的水力设计来提高泵装置多种运行模式下的水力性能。研究成果为泵站泵装置水力设计和优化提供了理论支撑和工程实践参考。

关键词: 轴流泵装置; 反向发电; 数值模拟; 水力性能; 优化

中图分类号: TH312; [TV734. 1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0188-05

1 引言

泵装置是泵站的核心, 开展泵装置优化研究显得尤为重要^[1]。目前, 关于泵装置流道研究的成果较丰富, 但对于已建泵装置全工况及反向发电情况下的流道优化研究较少^[2, 3]。对此, 本文以轴向速度均匀度和速度加权平均角为优化目标, 通过改变进出水流道弯肘段各断面尺寸及外侧型线, 选取不同进水流道和出水流道进行数值模拟, 完成对立式轴流泵装置进出水流道在泵模式和反向发电模式下的全工况水力性能优化, 旨在为泵站泵装置水力设计和优化提供理论支撑和工程实践参考。

2 数值计算

2.1 数学模型的选择

2.1.1 控制方程

立式轴流泵装置内部是以水为介质的不可压

缩粘性流体, 泵装置工作在常温状态, 故不考虑热量交换。控制方程为连续性方程和纳维斯托克斯(N-S)方程, 分别为:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2)$$

式中, u_i 、 u_j 分别为在 i 、 j 方向流速的瞬时值; x_i 、 x_j 均为坐标; ρ 为流体密度; t 为时间; F_i 为质量力; p 为流体压力; μ 为动力黏度。

2.1.2 湍流模型

RNG κ - ϵ 湍流模型能计算充分发展的流动状况, 可较好地处理强旋流和弯曲壁面流动。控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\kappa \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon}(G_\kappa + C_{3\epsilon}G_b)\epsilon/\kappa - C_{2\epsilon}\rho\epsilon^2/\kappa - R \quad (4)$$

式中, κ 、 ϵ 分别为湍动能、湍动能耗散率; α_κ 为 κ

收稿日期: 2022-10-26, 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009033); 江苏省自然科学基金项目(BK20200509); 中国博士后科学基金项目(2022T150185, 2022M711021)

作者简介: 胡言馨(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力机械优化设计, E-mail: 211606010127@hhu.edu.cn

通讯作者: 阚阚(1990-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水力机械优化设计及稳定性, E-mail: kankan@hhu.edu.cn

方程的湍流反作用普朗特数; μ_{eff} 为流体有效动力黏度; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能产生; G_b 为由于浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; C_{1e} 、 C_{2e} 、 C_{3e} 均为经验常数; R 为方程附加项。

2.2 边界条件和计算设置

采用 FLUENT 19.2 软件进行数值模拟。为更好地模拟泵装置内部流动,在泵装置进水流道前后各加一段进水前池,以保证水流进入进水流道为充分发展的紊流,更接近实际进口流速分布。进口设置在进水段进口断面,出口设置在出口延伸段出口断面。采用质量流进口、压力出口边界条件。紊流模型不适用于壁面边界层内的流动,所以对壁面需进行处理才能保证模拟精度。轴流泵装置在泵模式与反向发电模式运行下设置整个流场为计算域,均设置流量进口,压力出口边界条件,进、出水流道、叶轮轮毂、外壳及导叶体均设置为静止壁面,应用无滑移条件。

2.3 模型建立与网格划分

2.3.1 模型建立

立式轴流泵装置(图 1)由进水流道、叶轮、导叶、出水流道四部分组成。叶轮直径为 2 350 mm,转速为 166.7 r/min,叶片数为 5,导叶数为 8,泵站总设计流量为 50 m³/s,共有 4 个机组(3 用 1 备),单个机组的设计流量为 16.67 m³/s。



图 1 轴流泵装置模型图

Fig. 1 Model diagram of axial flow pump device

2.3.2 网格划分

为提高网格划分效率,泵装置进出口流道计算域采用结构化网格进行划分,叶轮与导叶部分采用非结构化网格进行划分,如图 2 所示。为获得高效合理的离散网格分辨率,以 4 套轴流泵装置全过流系统网格分析,最终确定本次对轴流泵的网格划分方案为方案 4,即进水流道、转轮体、导叶体、出水流道网格单元数分别为 340 × 10⁴、283 × 10⁴、280 × 10⁴、280 × 10⁴ 个,共计 1 183 × 10⁴ 个网格单元,进出口流道网格质量均在 0.42 以上,整体网格质量均在 0.3 以上。

3 立式轴流泵全工况流道优化

3.1 主要优化方案的确定

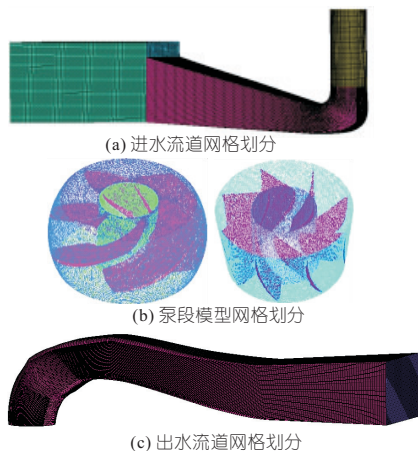


图 2 轴流泵装置网格图

Fig. 2 Grid diagram of axial flow pump device

3.1.1 进水流道水力性能优化

进水流道依据图纸尺寸建模,依次改变外缘轮廓从圆变方和断面收缩角度,4 种方案 JS1 ~ JS4 进水流道模型正视图、俯视图见图 3。出水流道为渐扩流道,为更好地设计流道,采取控制当量

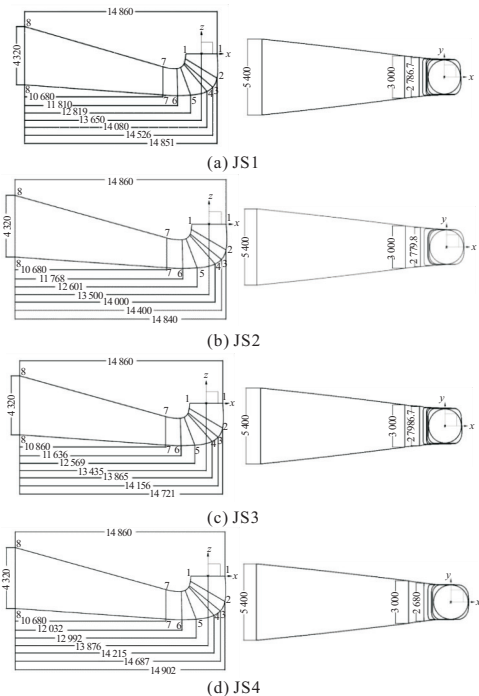


图 3 各设计方案进水流道模型图(单位: mm)

Fig. 3 Inlet channel model of each design scheme

扩散角的办法。当量扩散角 α 的计算公式为:

$$\alpha = 2\arctan[(R_1 - R_2)/L] \quad (5)$$

式中, R_1 、 R_2 分别为出水流道出口与进口的等效半径; L 为出水流道水平长度。

在初步建立出水流道模型的基础上,添加选定的进水流道及泵段,进行整体的泵装置计算,以导叶出口速度分布为出水流道进口的速度分布,对出水流道进行单独优化计算。依次改变外缘轮廓从圆变方和断面收缩角度,调整微调当量扩散

角,设计多个方案,现展示较好的三个方案 CS1~CS3(图 4)。

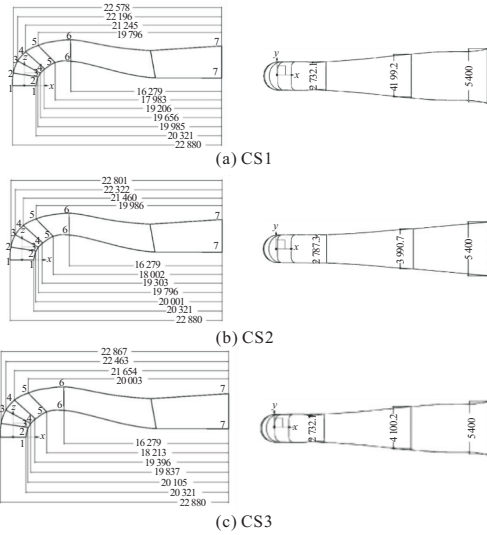


图 4 各设计方案出水通道模型图(单位:mm)

Fig. 4 Effluent channel model of each design scheme

3.1.2 进出水道泵工况及反向发电工况外特性计算

选取进出口断面,计算不同流量工况下进水流道的水力损失(图 5(a))。选取进水流道与叶轮段的交界面,计算该截面处的速度加权平均角与轴向速度分布均匀度(图 5(b)、(c))。选取进出口断面,计算反向发电不同流量工况下进水流道的水力损失(图 6(a))。选取反向发电工况进水流道与叶轮段的交界面,计算速度加权平均角与轴向速度分布均匀度(图 6(b)、(c))。

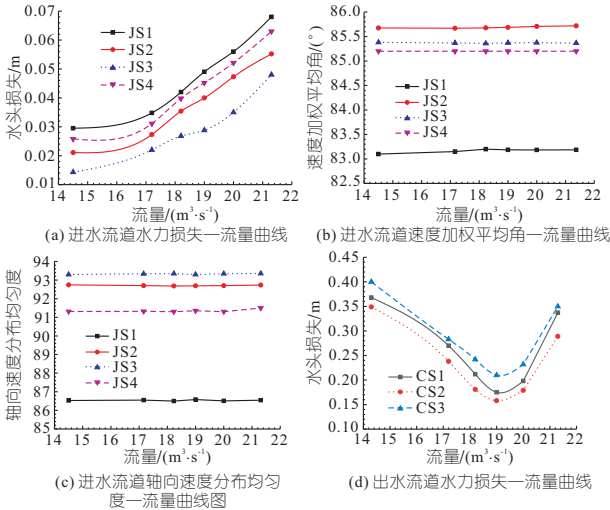


图 5 泵工况进出水道泵工况外特性图

Fig. 5 External characteristics of inlet and outlet channels under pump conditions

由图 5(a)、6(a)可知,轴流泵装置泵工况和反向发电工况的水力损失规律相同。不同方案下水力损失与流量成正相关,随流量的增大而增大。在进水流道处,水力损失主要是沿程损失,水流入口近似为方形截面,在弯肘处截面逐渐过渡至圆

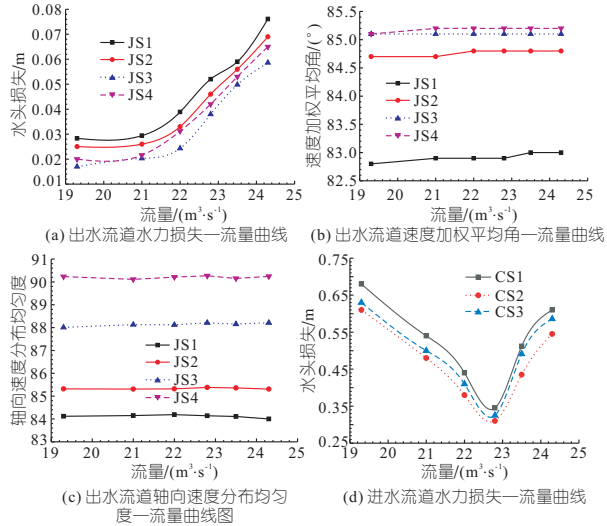


图 6 反向发电工况进出水道外特性图

Fig. 6 Characteristics of inlet and outlet flow channels in reverse power generation condition

形,流速迅速增大,各方案下弯肘部分的断面面积渐变程度不一,导致相同流量工况下水力损失不同。在弯肘中部过渡区域,水流的收缩利于减小损失,但收缩过大易导致水流混合紊乱,对进口流态产生影响。对比不同方案,相同流量工况下 JS3 的水力损失最小。

速度加权平均角用以衡量出口断面处切向速度与轴向速度的大小,速度加权平均角越接近 90°,水流越接近轴向流向。由图 5(b)、6(b)可知,在不考虑叶轮作用下,同一方案的泵工况和反向发电工况在不同流量工况下的速度加权平均角差别均较小,几乎不随流量变化。水流进入弯肘部分时流速迅速增加,此处水流受到挤压作用,弯肘内侧流速最大,在转弯后速度逐步转为轴向。由于流道作用周向速度降低,轴向加权平均角有所降低。对比不同设计方案,泵工况下相同流量工况时,JS2 方案的速度加权平均角最大,其次为 JS3 方案。反向发电相同流量工况时,JS4 方案的速度加权平均角最大,其次为 JS3 方案。

轴向速度分布均匀度反映了进水流道的流速分布的均匀程度,其值越接近 100%,进水流道的出口水流的轴向流速分布均匀性越好。由图 5(c)、6(c)可知,各方案在泵工况和反向工况下,断面均匀度变化趋势与速度加权平均角变化趋势相同。对比不同设计方案,泵工况下相同流量工况时,JS3 方案的轴向速度分布均匀性最好,其次为 JS2 方案。反向发电工况下,相同流量工况时 JS4 方案的轴向速度分布均匀性最好,其次为 JS3 方案。

选取进出口断面,计算不同流量工况下进水流道的水力损失。由图 5(d)可知,泵工况下 3 种方案均在流量 19.2 m³/s 时水力损失最小(图 6

(d)), 反向发电工况下 3 种方案均在流量 22.8 m³/s 时水力损失最小, 且均在 CS2 方案有最小水力损失。当扩散角过大时, 流道内损失偏大, 缩小扩散角, 改变断面尺寸, 可使水力损失减小。同时, 出水流道进口边的扩散角较小时, 中部的扩散角度偏大, 影响流态。对比不同设计方案, 相同流量工况下 CS2 的水力损失最小。

3.2 泵装置水力性能校核

选取水力损失较小的 JS3 和 CS2 方案, 用选定泵段进行泵装置的计算校核。水泵模型采用 TJ04-ZL-08 型号, 转速为 166.7 r/min, 转轮直径为 2 350 mm, 见图 7。

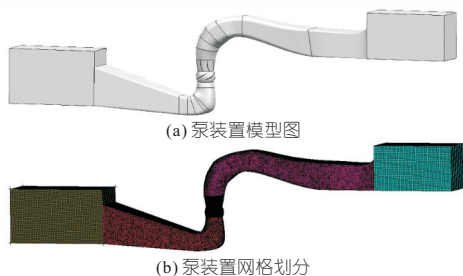


图 7 泵装置模型建立及网格划分

Fig. 7 Model establishment and grid division of pump device

对泵装置泵工况及反向发电工况进行不同流量工况下的定常计算。反向发电计算时, 将原来的进口边界条件改为压力出口, 出口边界条件改为流量进口。由图 8(a)、9(a)可知, 泵工况及反向发电工况的效率变化趋势相似, 随着流量增大, 效率先增大后减小。泵工况条件下最优工况流量为 19.2 m³/s, 扬程为 7.05 m, 效率为 80.73%。反向发电工况条件下最优工况流量为 22.8 m³/s, 水头为 16.8 m, 效率为 82.2%。流量增大会显著提高叶片进水边水流的绝对速度, 根据速度三角形原理, 与牵连速度合成的相对速度方向和大小会随之变化, 使水流相对速度的方向与叶片骨线方向先趋近后偏离, 使得在泵段部分的水力损失先减小后增大, 效率从而先增大后减小。

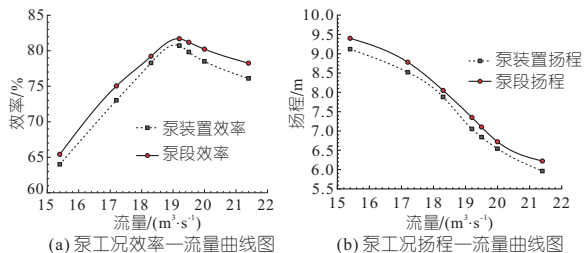


图 8 泵工况泵装置外特性图

Fig. 8 Pump conditions external characteristics of the pump unit

由图 8(b)可知, 泵工况条件下, 泵段与泵装置的扬程流量曲线变化规律一致, 即扬程随流量的增大而减小, 相同流量下泵段扬程明显大于泵

装置扬程; 由图 9(b)可知, 泵段与泵装置反向发电的水头流量曲线变化规律一致, 相同流量下反向发电泵段水头明显大于反向发电泵装置水头。泵工况与反向发电工况的变化均是由于进、出水流道存在水力损失造成。泵工况设计扬程为 7.25 m 时, 流量为 19.03 m³/s。反向发电工况设计水头为 16.8 m, 流量为 22.8 m³/s。

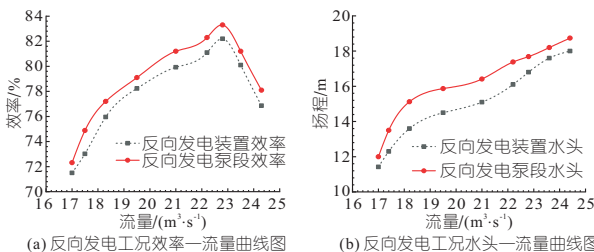


图 9 反向发电工况泵装置外特性图
Fig. 9 External characteristic diagram of pump unit under reverse power generation condition

在图 10(a)、(b)中, 通过对进、出水流道单独计算和整个泵装置计算, 可知泵装置的进、出水流道损失略大于单独计算的进、出水流道, 但差距较小。由此证明 JS3 和 CS2 方案在加入泵段后也能保证有相对较小的水力损失, 能够满足设计需要。

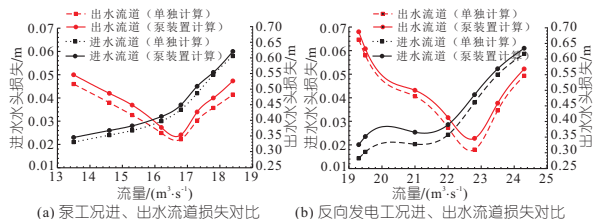


图 10 泵工况、反向发电工况泵装置流道损失对比图
Fig. 10 Comparison of flow path loss of pump device under pump working condition and reverse generation condition

4 结论

a. 进水流道优化得到 JS3 方案, 综合考虑不同流量工况下的水力损失、轴向速度分布均匀度、速度加权平均角, 该方案的水力损失最小、轴向速度分布均匀度与速度加权平均角较优。出水流道优化得到 CS2 方案, 综合考虑不同流量工况下的水力损失, 该优化方案的水力损失最小。进水流道方案的断面收缩尺寸均取值合理, 每个断面的渐变较小, 流道较顺滑, 能够满足优化设计要求。

b. 轴流泵装置采用水力损失较小的 JS3 和 CS2 方案, 用 TJ04-ZL-08 泵段进行泵装置的计算校核。转速为 166.7 r/min, 转轮直径为 2 350 mm, 最优泵工况流量为 19.2 m³/s, 扬程为 7.05 m, 效率为 80.73%; 最优反向发电工况流量为 22.8 m³/s, 水头为 16.8 m, 效率为 82.2%。轴流泵装置在泵工况和反向发电工况均表现出了较优

的水力性能,因此在泵站泵装置设计中,可通过充分的全工况流道设计,完善潜在具备反向发电工况的泵装置流道设计方案,进而实现高效节能和有效的经济效益的泵站功能。

参考文献:

[1] 张后文,李彦军,朱泉荣,等.大型双向流道泵装置

优化与试验研究[J].水泵技术,2021(2):24-28.

[2] 王朝飞,汤方平,石丽建,等.箱涵式轴流泵装置进出水流道优化设计[J].中国农村水利水电,2019(7):182-188.

[3] 陈佳,裴吉,袁寿其,等.基于泵轴流固耦合的双向流道轴流泵装置的数值分析[J].中国农村水利水电,2016(11):169-174.

Optimization of Flow Channel for Large Vertical Axial-flow Pump Device Under Both Pump Mode and Turbine Mode

HU Yan-xin¹,ZHANG Xin-chun²,CAI Zhi-zhou³,LIU Wei-dong¹,KAN Kan¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University, Nanjin 211100, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 3. State Nuclear Power Technology Corporation Ltd., Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Pump device is the core of pump station, it is very important to carry out optimization research of pump unit. Taking the uniformity of axial velocity and the weighted average angle of velocity as optimization objectives, the hydraulic performance of inlet and outlet channels of a large vertical axial flow pump under pump mode and reverse power generation mode was optimized under all working conditions. Through the multi-scheme modeling of the inlet and outlet flow channels of the vertical axial flow pump device, the size of each section and the outer inverted line of the elbow section of the inlet and outlet flow channels were changed without changing the initial surface and the shape of the outlet section. The numerical simulation results of different inlet and outlet flow channels were compared. The distribution uniformity of flow velocity at inlet and outlet section of impeller, the average angle of weighted velocity, the hydraulic loss at inlet and outlet channel, and the variation of external characteristics and performance of axial flow pump device were analyzed in detail under pump mode and reverse power generation mode. The research results show that the hydraulic design of the flow channel under pump condition and reverse power generation condition can be considered comprehensively to improve the hydraulic performance of the pump unit under various operating modes in the design stage of the pump device for pump station. The research results provide theoretical support and engineering practice reference for hydraulic design and optimization of pump device in pump station.

Key words: axial flow pump device; reverse power generation; numerical simulation; hydraulic performance; optimization

(上接第 187 页)

[3] 刘鑫,杨鼎宜,刘廉,等.热—力耦合作用下PVA纤维混凝土力学性能及其声发射响应[J].材料导报,2018,32(18):3135-3141.

凝土的高温后性能研究[J].科学技术与工程,2021,21(4):1522-1528.

[4] DUHONGXIU,JIANG YU,LIU GAILI,et al. CT image-based analysis on the defect of polypropylene fiber reinforced high-strength concrete at high temperatures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (materials science), 2017, 32(4): 898-903.

[7] 王泽柱,田正宏,杨韩刚,等.玄武岩粉与玄武岩纤维复掺增强混凝土性能及作用机理[J].水电能源科学,2021,39(3):107-111.

[5] 李瞳,张晓东,刘华新,等.高温后混杂纤维混凝土力学性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(5):1171-1177.

[8] LI HAIYAN,HAO XIANHUI,QIAO QI,et al. Thermal properties of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature[J]. Journal of materials in civil engineering, 2020, 32(3): 04020022.1-04020022.14.

[6] 李兵,林煜期,王宏,等.低坍落度聚丙烯纤维混

[9] 元成方,高丹盈.聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构特征研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(4):122-126.

Experimental Study on High Temperature Damage Behavior of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Based on Acoustic Properties

ZHU Cong-xiang¹,XU Jun²

(1. Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: In order to study the damage behavior of fiber reinforced concrete at high temperature, the acoustic characteristics of hybrid fiber reinforced concrete (PVA fiber and basalt fiber) at different temperatures were tested, and the mechanism was explained from the microscopic level by combining the results of the SEM. The results show that with the rising of temperature, the degree of ultrasonic waveform distortion is more significant, and the attenuation of waveform amplitude is gradually intensified; The incorporation of fiber or the increase of temperature will reduce the amplitude of the dominant frequency of the waveform and increase the energy dissipation caused by the ultrasonic penetration of the specimen. At high temperature, after PVA fiber is melted, a large number of pores remain and gradually form connecting pores, which promote the release of pore steam pressure and alleviate high-temperature damage, while basalt fiber continues to play a bridging effect to inhibit the continuous development of high-temperature cracks.

Key words: hybrid fiber concrete; acoustic characteristics; high temperature; damage behavior; steam pressure