

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230039

基于声学特性的混杂纤维混凝土高温损伤行为试验

朱从香¹, 徐俊²

(1. 扬州工业职业技术学院, 江苏扬州 225000; 2. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏镇江 212100)

摘要: 为研究纤维混凝土高温损伤行为, 开展不同温度下混杂纤维混凝土(PVA纤维和玄武岩纤维)的声学特性试验, 并结合电镜扫描 SEM 结果从微观层面进行机理解释。结果表明, 随温度不断攀升, 超声波波形畸变程度越显著, 波形幅值衰减逐渐加剧; 掺入纤维和温度升高均会导致波形主频幅值降低, 加剧超声波穿透试件引起的能量耗散。高温下, PVA 纤维熔化后残留大量孔道, 并逐渐形成连通孔, 促进孔隙蒸汽压力的释放, 缓解高温损伤, 而玄武岩纤维继续发挥桥连效应, 抑制高温裂纹的不断发展。

关键词: 混杂纤维混凝土; 声学特性; 高温; 损伤行为; 蒸汽压力

中图分类号: TV431⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0184-04

1 引言

高温使得混凝土中游离水和结合水汽化, 促进水化产物分解, 从而产生巨大孔隙蒸汽压力, 造成混凝土发生爆裂和结构损伤, 直接折损混凝土力学性能, 危及结构安全性^[1,2]。研究^[3,4]表明, 在混凝土中掺入适量聚合物纤维(如 PVA 纤维)可抑制高温爆裂现象。高温引起混凝土基体中分布的聚合物纤维产生熔化, 在纤维所在位置形成纵横交错的微孔洞、微裂隙, 使得混凝土透气性增强, 从而一定程度减小混凝土内部因高温产生的孔隙蒸汽压力^[5], 但单掺 PVA 无法解决高温后混凝土延性失效问题。考虑到玄武岩纤维耐高温、高强特性, 本文以混掺 PVA 纤维和玄武岩纤维(BF)混凝土为例, 纤维掺量共设计 5 组, 同时设计 5 个温度等级, 开展超声波检测, 旨在研究纤维掺量和高温对混杂纤维混凝土超声波特性的影响, 同时结合扫描电镜测试, 进一步从细观角度剖析高温内部损伤机理。

2 试验概况

2.1 原材料与试件制备

试验胶凝材料采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水

泥; 细骨料选用细度模数为 2.45 的天然河沙, 最大粒径为 4.5 mm; 粗骨料采用连续级配碎石, 粒径范围为 5.5~12.0 mm; 减水剂为减水率 40% 的聚羧酸高效减水剂。PVA 和 BF 主要物理力学参数见表 1, 二者体积掺量比按 1:1 混杂。试验设计了 5 组纤维体积掺量, 即 V_f 为 0%、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%, 其中 $V_f=0%$ 为素混凝土, 作为参照。

表 1 PVA 和 BF 几何及性能指标参数表

Tab. 1 Geometric and performance index parameters of PVA and BF

纤维	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	直径 /mm	长度 /mm	熔点 /°C
PVA	1.31	1 650	43.2	0.040	12	245
BF	2.80	2 250	79.5	0.016	12	1 500

2.2 试验内容

根据配合比设计, 将预先称量好的细、粗骨料及水泥干拌 2 min, 之后再缓慢加入称量好的水及减水剂, 充分搅拌 3 min, 分成少量多次加入纤维, 搅拌均匀, 使其充分分散, 不结团不成片叠加。将搅拌均匀的混凝土拌合物, 分别浇筑于高×底面直径为 100 mm×50 mm 的圆柱形模具和边长为 150 mm 的立方体模具中, 在室内环境养护 24 h 后脱模, 然后移至标准养护条件(温度 20 ± 2 °C, 湿度大于 95%)下继续养护 28 d。试验前, 为

收稿日期: 2023-01-09, 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108216); 扬州市装配式建筑技术公共服务平台(YZ2022149); 2021 年校级科研项目(2021xjzk015)

作者简介: 朱从香(1978-), 女, 硕士、副教授, 研究方向为混凝土结构耐久性, E-mail: zhucongxiang1753@163.com

尽量消除试件表面与仪器加载面之间接触不牢对试验结果产生的影响,对混凝土试件的端部打磨平整平滑。

2.3 测试方法

混凝土高温试验采用科索特炉业有限公司生产的箱式电阻炉。试验设计 20、105、250、400、600 °C 共 5 级目标温度,升温速率设定为 20 °C/min。达到目标温度后,先保持恒温 3 h,然后在炉内自然降至室温。为减小试验数据的离散性,每组工况下的混凝土试件均制备三个,试验结果取平均值。

采用海创高科公司生产的 HC-U96 型声波测试仪测试不同纤维掺量混凝土试件,测试仪的主要参数为电压 250 V,脉冲宽度 5 000 ns,频带宽度为 10 kHz~1 MHz,增益范围为 170 dB,增益精度为 0.5 dB。测试前,为消除贴合不紧密对试验结果造成的不利影响,在试件端部和测试探头均匀涂抹凡士林,确保探头与试件端部紧密贴合。

3 试验结果分析

3.1 超声波波速分析

图 1 为超声波穿透经不同温度作用的混凝土试件后的波速分布曲线。由图 1 可知,随着温度攀升,波速逐渐降低,降低幅度范围为 4.3%~57.9%。原因为高温直接导致混凝土内部萌生新裂纹或微孔洞,特别是孔隙结构及基体—纤维界面过渡区的损伤增多,密实度降低。超声波传播至高温裂纹或裂隙处会自发产生绕行、反射等现象^[6],从而导致传播速度下降。这是由于在拌合物中掺入纤维时,无法避免会引入一定量空气,纤维掺量越大,引入空气量越多,孔隙率也就越大;而超声波在空气中传播速度显著低于固体介质;

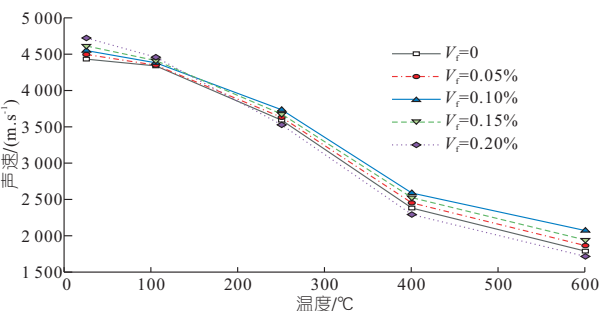


图 1 超声波穿透不同温度作用的混凝土试件波速分布曲线

Fig. 1 Curve of wave velocity distribution of concrete specimen with ultrasonic penetration at different temperatures

另一方面,PVA 和 BF 与混凝土基体性质差异大,导致在界面过渡区极易引发超声波反射、折射,纤维的掺入降低了波速。

相对于 20 °C,在 105 °C 下超声波通过 $V_f = 0.05\%$ 、 0.10% 、 0.15% 、 0.20% 的试件,波速分别降低 5.15%、4.33%、3.15%、2.47%,波速降幅随 V_f 增加而降低。这是因为当 105 °C 时,PVA 和 BF 均尚未熔化,仍能继续发挥桥连效应,纤维可有效抑制温度引起的裂缝萌生、张裂和扩展。当温度继续攀升,波速随掺量增加呈先增大后降低,在 $V_f = 0.10\%$ 下,波速达到最大,表明高温后部分纤维软化或熔化,可显著降低高温引起的损伤度;但掺量过大(如 $V_f = 0.20\%$),PVA 熔化后在基体中残留大量孔道,反而加重损伤程度。

3.2 超声波波形分析

图 2 为超声波穿透不同温度下素混凝土和纤维掺量 $V_f = 0.10\%$ 的纤维混凝土试件波形变化图。由图 2 可知,随着温度攀升,波形畸变程度越显著,幅值衰减加剧。对于素混凝土,与 20 °C 对比,400、600 °C 对应最大幅值衰减分别为 3.42、4.08 dB,而对纤维混凝土分别为 1.23、2.16 dB。这是由于高温造成混凝土产生不可逆的损伤和缺陷,萌生新裂纹,温度越高,造成的损伤越大,能量耗散增加,从而引起表征波动能量的波形幅值降低。

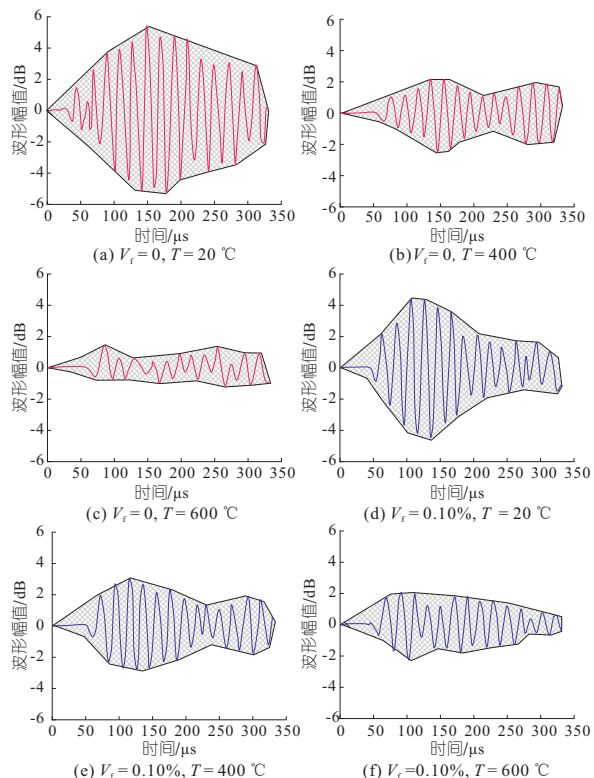


图 2 不同温度下不同纤维掺量混凝土超声波波形图

Fig. 2 Ultrasonic wave diagram of concrete with different fiber content at different temperatures

在 20 °C 下,素混凝土和纤维混凝土的波形最大幅值分别为 5.2、4.3 dB,后者波形幅值偏小。由于拌合过程中纤维的掺入不可避免引入一定量空气,含气量增加,降低了密实度,因此能量耗散更大。另外,与同温度下素混凝土相比,超声波通过纤维混凝土后波形畸变及幅值衰减更小,这说明 PVA 和 BF 的掺入明显缓解了高温造成超声幅值及能量耗散的降低,即有效抑制高温造成的内部永久损伤。

3.3 超声频谱分析

图 3 为 20、400 °C 下素混凝土和纤维混凝土 ($V_f = 0.10\%$) 超声频谱分布图。由图 3 可知,20 °C 下素混凝土的波形主频为 48.5 kHz,掺入纤维和温度升高均会导致波形主频幅值降低。这说明纤维掺入和高温作用均会加剧超声波穿透试件引起的能量耗散。还可以看出,经高温作用后,各试件超声波高频段 (>100 kHz) 的频谱幅度均趋近于 0 dB,且主频频谱幅值也明显低于 20 °C 工况。这意味着高温造成混凝土试件萌生新的缺陷和损伤增多,引发超声波能量耗散大幅增加。

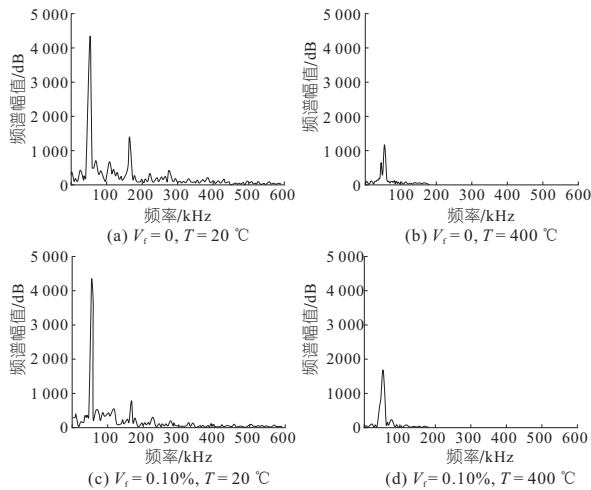


图 3 不同温度下不同纤维体积掺量混凝土的超声波频谱图
Fig. 3 Ultrasonic spectrum of concrete with different fiber volume at different temperatures

3.4 超声波能量谱分析

对于经不同温度作用后的混凝土试件,从传播其中的超声波频谱分布特征(图 3)可以看出,其波动能级主要集中在 0~100 kHz 频段范围,因此分析该频段范围的能量占比特征更具实际意义。图 4 为不同纤维掺量下混凝土超声波 0~100 kHz 频段范围的能量占比随温度的变化曲线图。由图 4 可知,对于所有工况,超声波穿透试件后在 0~100 kHz 频段范围的能量占比均在 83.5% 以上,且能量占比随温度的升高逐渐增大,在 200 °C 之前增长快速,而 200 °C 之后放缓。分

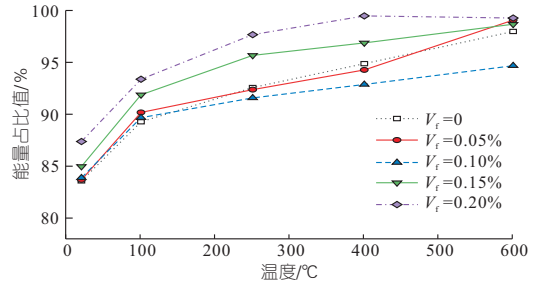


图 4 在 0~100 kHz 超声波能量占总能量比值
Fig. 4 Ratio of ultrasonic energy to total energy at 0-100 kHz

析原因为随着温度攀升,试件内部萌生更多裂隙、微孔洞等高温损伤缺陷,超声波高频段 (>100 kHz) 能量更易被微裂缝等缺陷部位所吸收,故能量逐渐向低频段转移和集中。

为细化超声波在各频段能量分布特征,将能量较为集中的 0~100 kHz 频段范围平均划分为 10 个频段。以 20 °C 为例,计算各频段超声波能量占总能量比值,见图 5。由图 5 可知,能量分布类似正态分布曲线,由于混凝土的超声主频即位于 48.5 kHz 附近^[7],因此频段 5 (50 kHz) 对应的能量占比最大。基于此,将各试件频段 5 能量占比随温度的变化图绘制于图 6。由图 6 可知,在 20、105、250、400、600 °C 下,超声波在频段 5 的能量占比分别为 40.2%、46.5%、54.5%、58.4%、62.9%。随着温度攀升,超声波在频段 5 能量占比逐渐增加,在 6~10 频段能量则有所降低,意味着内部损伤随温度升高而增大,阻碍高频段在混凝土中的传播。

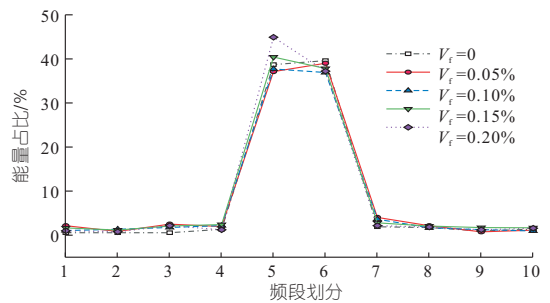


图 5 温度为 20 °C 下各频段能量占比
Fig. 5 Energy ratio diagram of each frequency band at 20 °C

在 20 °C 下,穿透不同纤维掺量混凝土试件超声波在频段 5 的能量占比分别为 35.9%、37.1%、38.3%、40.5%、43.7%,即随纤维掺量的增加而增大,这表明 PVA 和 BF 的掺入增大了试件的孔隙率,能量逐渐向主频段集中。250 °C 时,各纤维在频段 5 能量占比分别为 53.8%、53.2%、51.8%、54.5%、56.2%。频段 5 能量占比随纤维掺量的增加呈先减后增的趋势。当达到 400 °C 后, $V_f = 0.10\%$ 试件在频段 5 的能量占比

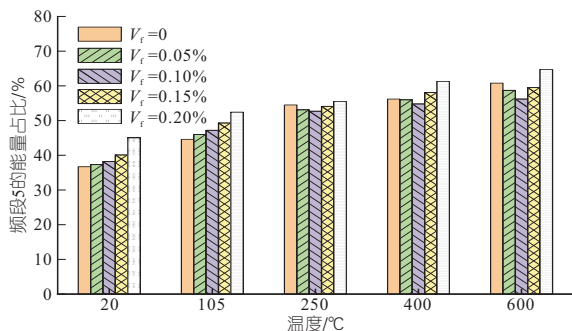


图 6 不同温度频段 5 能量占比分布图

Fig. 6 Distribution diagram of energy ratio in different temperature frequency band 5

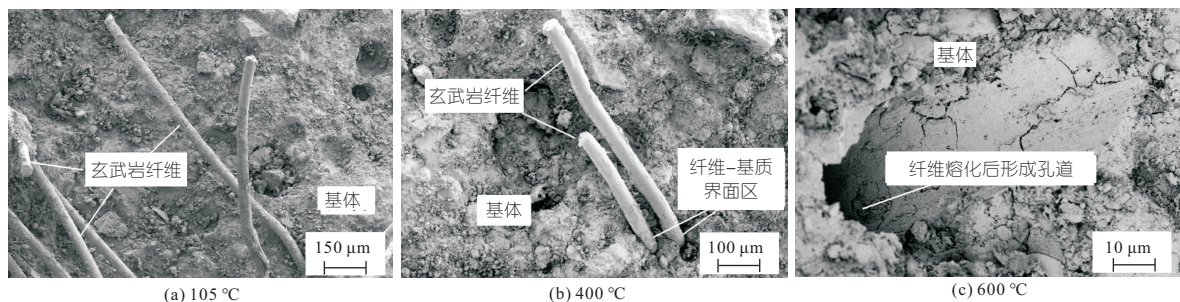


图 7 高温下混杂纤维混凝土 SEM 图

Fig. 7 SEM diagram of hybrid fiber concrete under high temperature

发,而结合水和水化硅酸钙 C-S-H 开始分解;继续升至 400 °C 时,结合水脱离化合状态并蒸发,C-S-H 也分解完成;当升至 600 °C 时,未水化的颗粒物质和石英开始晶体化,同时产生体积膨胀。由于混凝土各组分的热传导系数和膨胀系数差异较大,继而产生不均匀膨胀变形引发发热开裂现象,加剧损伤程度^[8]。

对于混杂纤维混凝土,随着温度的升高,PVA 纤维逐渐软化,导致其与基体界面粘结性降低,甚至与基体脱离开形成微孔隙,透气性增强,孔隙蒸气压力随之降低,高温造成的内部结构损伤减小。同时,另一部分未熔化的 PVA 纤维和全部 BF 仍继续发挥桥连效应,有效削弱孔隙蒸气压力对试件结构的损伤。当温度继续攀升至 400 °C 及以上时,PVA 纤维已全部熔化,残留大量空隙,而高熔点的 BF 则继续存在。在孔隙蒸气压力和温度应力的协同作用下,孔隙或微裂隙尖端处产生应力集中^[9],萌生大量微裂缝,并使得新生与原有孔洞、微裂缝不断连通贯裂,形成空间交错分布的裂纹网络,进一步增强混凝土透气性,从而大大缓解孔隙蒸气压力对混凝土造成的破坏和损伤。与此同时,BF 则继续发挥显著的桥连效应,有效阻止高温裂纹的无约束地不断发展、贯裂,有力维持试件的整体性和密实性。但当掺入过多 PVA 纤维,熔化后在基体中残留大量孔道及纤维—基体界面过渡区裂纹,由高温引发的缺

陷将占据主导地位。

4 高温损伤机理分析

图 7 为 105、400、600 °C 下掺量 $V_f=0.10\%$ 试件的 SEM 图。随着温度的攀升,含水率降低,赋存的自由水和结合水先后发生汽化,孔隙蒸气压力随之产生,从而极易引发界面过渡区萌生微裂缝,继而进一步扩展、张裂,波速降低。对于素混凝土,当温度升至 105 °C 时,自由水已全部蒸

陷将占据主导地位。

5 结论

a. 随温度不断攀升,超声波波形畸变程度越显著,波形幅值衰减逐渐加剧。对于素混凝土,与常温对比,400、600 °C 对应最大幅值衰减分别为 3.42、4.08 dB;而纤维混凝土对应最大幅值衰减分别为 1.23、2.16 dB。

b. 常温下素混凝土的波形主频为 48.5 kHz,掺入纤维和温度升高均会导致波形主频幅值降低,加剧超声波穿透试件引起的能量耗散。

c. 超声波在 0~100 kHz 频段范围的能量占比均在 83.5% 以上,且能量占比随温度的升高逐渐增大。能量在 10 个频段范围的分布类似正态分布曲线。随着温度逐渐攀升,超声波在频段 5 能量占比逐渐增加,在 6~10 频段能量则有所降低。

d. 高温下,PVA 纤维熔化后残留大量孔道和微空隙,并逐渐形成空间网状分布的连通孔,有力促进孔隙蒸气压力的释放,而 BF 继续发挥桥连效应,阻碍高温裂纹的不断发展。

参考文献:

- [1] 薛维培,刘晓媛,姚直书,等.不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J].复合材料学报,2020,37(9):2285-2293.
- [2] 金浏,张仁波,杜修力,等.温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J].土木工程学报,2021,54(3):1-18.

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