

功率超声对水泥基复合材料流变性能的影响

叶姝君¹,梁浩²,刘圣洁³,宋雷¹,赵之仲^{1*},彭庚^{4,5}

1. 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357;2. 山东鲁中公路建设有限公司,山东 淄博 255086;
3. 北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 102616;4. 北京市市政工程研究院,北京 100032;
5. 北京市政路桥科技发展有限公司,北京 100032

摘要:为提高水泥颗粒的分散均匀性,研究功率超声对水泥基复合材料流变性能的影响,采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,以萘系减水剂FDN-C为减水剂,采用功率超声对水泥浆体进行预分散处理,在不同水灰质量比(0.50、0.55)、超声功率(250、500、750 W)、超声时间(0~4 min)下测试浆体的流动度和泌水率,研究功率超声对水泥浆体流变性能的影响。结果表明:超声时间相同时,水泥浆体的流动度随超声功率的增大而增大,泌水率随超声功率的增大而先减小后增大,超声功率为750 W时,不同水灰质量比的水泥浆体的流动度和泌水率均最大;超声功率相同时,超声作用4 min后2种水灰质量比水泥浆体的流动度均最大,水灰质量比为0.50水泥浆体的泌水率随超声时间的增大而呈减小→增大→减小→增大的变化趋势,超声作用3 min时,水灰质量比为0.55水泥浆体的泌水率继续增大。相比减水剂,功率超声在更短时间内改变水泥浆体的流变性能,超声功率为750 W、超声时间为2 min时和超声功率为500 W、超声时间为4 min时改变水泥浆体的流变性能效果最显著。

关键词:水泥基复合材料;功率超声;流变性;流动度;泌水率;减水剂

中图分类号:U414;U416.216

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0063-06

引用格式:叶姝君,梁浩,刘圣洁,等.功率超声对水泥基复合材料流变性能的影响[J].山东交通学院学报,2024,32(3):63-68.

YE Shujun, LIANG Hao, LIU Shengjie, et al. Influence of power ultrasound on the rheological properties of cement-based composite materials[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 63-68.

0 引言

水泥是典型的多维度材料,流变性能是影响水泥浆体使用性能的重要指标之一^[1]。在水泥水化过程中,内部水泥颗粒及纳米级水化产物因颗粒间的位阻效用呈不同程度的团聚性,影响水泥基材料的流变性能^[2-3]。在不同作业场景下,施工对浆体流变性的需求不同^[4-6],须选择有效的水泥浆体颗粒分散方式,实现水泥基材料流变性能的迅速转变。

在传统施工中,大多采用搅拌的方式打散水泥基原料,主要包括自落式搅拌和强制式搅拌,受设备所限,搅拌过程中仍存在分散低效区^[7]。还可采用添加减水剂的方式打散水泥基原料,但部分减水剂对混凝土流变性的调控作用有负面影响^[8-9],易导致泌水与离析,水泥硬化后形成较大孔穴结构和微裂缝,耐久性降低^[10-11]。

超声波在液相环境中传播时产生的超声效应有利于减少颗粒团聚,超声波作用于液体介质时,因声

收稿日期:2023-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2601900)

第一作者简介:叶姝君(1999—),女,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:2835791053@qq.com。

*通信作者简介:赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

波正负压交替易导致气泡重复膨胀与收缩并迅速生长^[12-14]。气泡尺寸达到空化阈值时瞬间溃灭,并在极小范围内产生约 5 000 ℃ 的超高温^[15-16],同时产生大于 400 km/h 的高速射流,增强水泥颗粒表面的质量传递,导致絮状结构解体,分散均匀度较好^[17]。已有研究中多为超声波在超声检测与精密加工等方面的应用,在水泥浆体的分散研究则较少^[18]。

本文基于超声波振动引起的空化作用,采用高效机械力解决原始搅拌方式导致水泥颗粒分散不均匀的问题,并代替减水剂化学效应,进行水泥浆体流动度、泌水率试验,研究超声功率、超声时间及水灰质量比等因素对水泥浆体流变性能的影响,确定水泥浆体功率超声作用的关键技术参数,以期为该技术在工程上的推广应用提供理论支撑。

1 原材料与试验设计

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥各性能指标的检测结果如表 1 所示,各项性能符合文献[19]要求。以萘系减水剂 FDN-C 为减水剂,萘系减水剂 FDN-C 为褐黄色粉末,固体的质量分数大于 94%,pH 为 7~9,硫酸钠的质量分数为 18%,减水率为 18%~28%,各项性能符合文献[20]要求。水为日常饮用水。

表 1 水泥各性能指标的检测结果

项目	安定性/ mm	凝结 时间/min		标准稠 度需水 量/%	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	细度 (80 μm 筛余)/%	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 干缩率/%	耐磨性/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	抗折 强度/MPa		抗压 强度/MPa	
		初凝	终凝							3 d	28 d	3 d	28 d
试验结果	2.5	330	400	28.4	380	3.6	3 120	0.06	2.1	4.5	9.7	21.5	48.6
指标要求 ^[19]	≤ 5.0	≥ 180	360~ 600	30.0	300~450	≤ 10.0	$\approx 3\ 100$	≤ 0.10	≤ 3.0	≥ 3.5	≥ 6.5	≥ 16.0	≥ 42.5

为分析超声功率对水泥基材料流变性能的影响,定义 2 组试样的水灰质量比分别为 0.50、0.55,在不同超声功率下进行流动度试验,在不同超声时间下进行泌水率试验,根据试验数据分析流变性能。

1.1 流动度试验

每组试样需称取 300 g 水泥、适量水及萘系减水剂 FDN-C,共 20 组,分别采用水泥浆体搅拌机慢速搅拌 60 s,停 15 s,将搅拌机叶片上的水泥浆体刮入搅拌桶内,快速搅拌 120 s,停止运行搅拌机,将搅拌桶内水泥浆体立即倒入烧杯,置于磁力搅拌器中,开启超声制备浆体。提前用湿抹布润湿玻璃板及水泥浆体流动度试模,将水泥浆体全部倒入试模中,用刮刀刮去上部多余浆体后,立即垂直提起试模,使浆体自由流动,计时 30 s 后立即用钢直尺分别量取流动部分互相垂直的 2 个方向的最大直径,如图 1 所示,取平均直径作为水泥浆体流动度。

洗净试模与玻璃板并提前润湿后,再进行下 1 组试验。

1.2 泌水率试验

取流动度试验剩余水泥浆体 (50 ± 1) g,将其密封放置于聚丙烯塑料杯中,设其总质量为 m_1 。

每隔 0.5 h 用塑料滴管吸取杯中上层所析出水并记录质量(精确至 0.01 g),当浆体泌水量小于 0.10 g 时,每 10 min 吸取 1 次水,直至浆体不再发生泌水现象,计算全部吸取水的质量,定义为总泌水质量 m_2 。泌水率 $N = m_2 / m_1$ 。

1.3 试验组设置

设计 10 个试验组,超声功率分别为 0、250、500、750 W,在不同减水剂的质量分数 w_1 和超声时间下

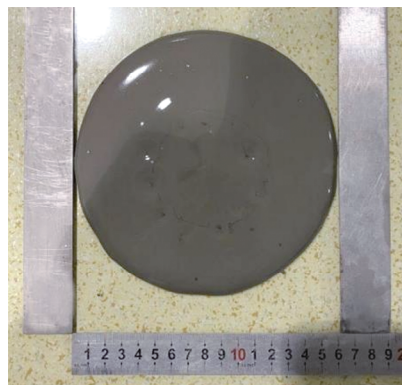


图 1 水泥浆体最大流动度测量方法

分析超声功率对水泥浆体流变性能的影响,试验参数如表2所示。

表2 超声功率对水泥浆体流变性能影响的试验参数设置

试验组 编号	水灰 质量比	$w_1/\%$	超声 功率/W	超声 时间/min	试验组 编号	水灰 质量比	$w_1/\%$	超声 功率/W	超声 时间/min
H ₀		0	0	0	I ₀		0	0	0
H ₁		0	250	2	I ₁		0	250	2
H ₂	0.50	0	500	2	I ₂	0.55	0	500	2
H ₃		0	750	2	I ₃		0	750	2
H ₄		1	0	0	I ₄		1	0	0

设计10个试验组,未添加减水剂,超声功率为500 W,分别采用超声0、1、2、3、4 min分析超声时间对水泥浆体流变性能的影响,试验参数如表3所示。

表3 超声时间对水泥浆体流变性能影响试验的参数设置

试验组编号	水灰质量比	超声时间/min	试验组编号	水灰质量比	超声时间/min
J ₀		0	K ₀		0
J ₁		1	K ₁		1
J ₂	0.50	2	K ₂	0.55	2
J ₃		3	K ₃		3
J ₄		4	K ₄		4

2 试验结果分析

2.1 超声功率

不同超声功率对各组水泥浆体的流变性能的影响结果如表4所示。

表4 不同超声功率对各组水泥浆体的流变性能的影响结果

试验组编号	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
流动度/mm	100	115	135	150	123	153	158	171	203	173
泌水率/%	2.56	2.31	2.92	4.76	3.70	2.59	2.23	2.71	5.21	3.64

由表4可知:水泥浆体的流动度随超声功率的增大而增大,超声功率为750 W时,不同水灰质量比的水泥浆体的流动度最大,H₃的流动度比未进行超声的H₀增大50.0%,I₃的流动度比未进行超声的I₀增大32.7%,H₃的流动度比添加减水剂的对照组H₄增大22.0%,I₃的流动度比添加减水剂的对照组I₄增大17.3%,应用功率超声可减少水泥基材料的用水量,比添加减水剂更能提高水泥浆体的流动性。作用机理为功率超声与水泥浆体中的颗粒共振发生超声空化作用,部分浆体颗粒剥落或水泥团聚颗粒解体,释放水分子,流动度增大。

超声时间相同时,不同水灰质量比的水泥浆体的泌水率随超声功率的增大而先减小后增大,超声功率为750 W时泌水率最大。原因是超声功率为250 W时,超声波产生的剪切力和冲击力无法与絮凝颗粒积极耦合作用,无法克服颗粒间的静电引力和范德华力,颗粒分散不明显。超声功率较大时,超声空化导致团聚的水泥颗粒解体,有效释放水分子,泌水率增大。在超声功率为750 W、超声作用2 min时,水灰

质量比为 0.50 的水泥浆体的泌水率最大,为 4.76%,比未采取功率超声处理的水泥浆体增大 85.9%;水灰质量比为 0.55, I_3 的泌水率为 5.21%,比未采取功率超声处理的试样增大 101.2%,功率超声可提高水泥颗粒与水分子的分散效果。

2.2 超声时间

不同水灰质量比下,不同超声时间对各组水泥浆体的流变性能的影响结果如表 5 所示。

表 5 不同超声时间对各组水泥浆体的流变性能的影响结果

试验组编号	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
流动度/mm	100	120	135	135	146	153	162	171	164	173
泌水率/%	2.56	1.98	2.92	2.09	3.33	2.59	1.96	2.71	3.50	3.74

由表 5 可知:超声 4 min 时,2 种水灰质量比水泥浆体的流动度均最大;水灰质量比增大,用水量增大,浆体流动度显著增大,超声时间分别为 0、1、2、3、4 min 时,水灰质量比为 0.55 的水泥浆体流动度比水灰质量比为 0.50 的水泥浆体分别增大 53.0%、35.0%、26.7%、21.5%、18.5%,随超声时间延长,增幅减小。表明超声作用时间越长,水灰质量比对水泥浆体流动度的影响越小,原因是超声时间较长导致浆体内部絮凝及抱团颗粒解体→团聚→再解体→再团聚循环发生,水泥浆体析出多余水分,浆体内部的水化产物颗粒分散更均匀。

水灰质量比为 0.50 水泥浆体的泌水率随超声时间的增大而呈减小→增大→减小→增大的变化趋势,原因是受超声作用影响,初期颗粒絮凝及团聚状态被打开,释放水分子,泌水率增大;随超声作用时间的增加,颗粒分散后继续高速运动,颗粒间再次碰撞堆叠,再次包裹水分子,产生絮凝聚团的概率增大,泌水率减小,依此循环变化。超声作用 3 min 时,水灰质量比为 0.55 水泥浆体的泌水率的变化趋势与水灰质量比为 0.50 的水泥浆体相反,泌水率继续增大。原因是超声功率为 750 W 时,水灰质量比为 0.55 的水泥浆体的多余水分无需参加颗粒团聚过程,且空化效应阈值随超声时间增大而减小,产生空化泡核的时间越短,空化泡溃灭所需时间越短。超声空化作用产生的高速冲击波和微射流破坏了絮凝水泥颗粒的团聚,浆体中的自由水增多,浆体泌水率增大。

3 结束语

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,以萘系减水剂 FDN-C 为减水剂,在不同水泥浆体水灰质量比、超声功率、超声时间下测试水泥浆体的流动度和泌水率,根据试验结果分析功率超声对水泥基材料流变性能的影响,水泥浆体的流动度与超声功率及超声时间正相关,在超声功率为 750 W、超声作用 2 min 时,水灰质量比为 0.50 的水泥浆体的流动度最大,为 150 mm,比未采取超声处理的水泥浆体增大 50.0%;水灰质量比为 0.55 的水泥浆体的流动度最大,为 203 mm,比未采取超声处理的水泥浆体增大 32.7%。随超声时间增加,水灰质量比为 0.50 的水泥浆体的流动度持续增大,水灰质量比为 0.55 的水泥浆体的流动度增幅不大。

水泥浆体的泌水率随超声功率的增大而先减小后增大,在超声功率为 750 W、超声作用 2 min 时,水灰质量比为 0.50 的水泥浆体的泌水率最大,为 4.76%,比未采取超声处理的水泥浆体增大 85.9%;水灰质量比为 0.55 的水泥浆体的泌水率最大,为 5.21%,比未采取超声处理的水泥浆体增大 101.2%。

超声功率为 500 W,超声 4 min 时,2 种水灰质量比水泥浆体的流动度最大。水灰质量比为 0.5 水泥浆体的泌水率随超声时间的增大而呈减小→增大→减小→增大的变化趋势,水灰质量比为 0.55 的水泥浆体泌水率随超声时间的增加而增大。

本试验仅对单枚超声探头对水泥浆体流变性能展开研究,后续可对多枚超声设备联合布设干涉水泥浆体展开进一步研究;同时,本文仅对超声分散水泥浆体流变性能进行研究,后续可加强力学性能及微观

变化研究,以对水泥浆体的分散程度进行更深一步探索。

参考文献:

- [1] 易军艳,毛青洋,王东升,等. 半柔性混凝土路面水泥浆料的研发与性能评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019,35(5):892-898.
- [2] 郑召. 纤维增强聚合物改性水泥基修复材料的制备及性能研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2016.
- [3] 杨彦海,朱晓,杨野,等. 寒区冷补沥青液的制备及优化设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023,39(2):305-313.
- [4] 吴书君,唐军,吴艳玲. 飞灰替代矿粉对沥青胶浆性能的影响[J]. 山东交通学院学报, 2022,30(3):115-122.
- [5] 刘东,徐金玉,吴昱瀚,等. 破碎砾石就地热再生技术在成渝高速中的应用[J]. 山东交通学院学报, 2022,30(2):94-100.
- [6] 冯立超,刘晓燕,朱晓华,等. 废弃 FRP 在水泥基材料中的循环再利用[J]. 山东交通学院学报, 2018,26(4):64-69.
- [7] 肖铁链. 振动搅拌碾压混凝土的试验研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [8] 张丽秀,张营,魏晓奕,等. 油基石墨烯纳米流体黏度变化规律研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023,39(3):545-554.
- [9] 段珍华,侯少丹,潘智生,等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. 建筑结构学报, 2020,41(增刊2):420-426.
- [10] 潘莉莎,田政,杜治光,等. 5 种常用减水剂对水泥砂浆耐久性的影响[J]. 建筑材料学报, 2012,15(1):135-138.
- [11] 邓友生,冯爱林,孟丽青,等. 煤矸石混凝土性能与资源化应用研究评述[J]. 矿产综合利用, 2023(2):169-176.
- [12] 宋华浩,金会心,王正兴,等. 超声波场下氢氧化铝制备超细氧化铝的研究[J/OL]. 有色金属科学与工程. (2023-06-02)[2023-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20230601.1527.004.html>.
- [13] 曾祥菲. 基于表面强化的菱锰矿浸出研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2022.
- [14] 郑雅欣. 声空化气泡的 Gilmore-NASG 模型及其动力学特性[D]. 通辽:内蒙古民族大学, 2022.
- [15] 李军. 软性磨粒流湍流强化加工方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2017.
- [16] 周钰沅. 助磨剂-矿物改性对钕铁磁铁矿磨矿的影响[D]. 武汉:武汉科技大学, 2022.
- [17] 陈鑫冰. 超声作用下水泥基材料的力学及流变性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- [18] 赵肖媛. 仿生电化学池及其应用[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 通用硅酸盐水泥:GB 175—2023[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2023.
- [20] 全国水泥制品标准化技术委员会. 混凝土外加剂:GB 8076—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.

Influence of power ultrasound on the rheological properties of cement-based composite materials

YE Shujun¹, LIANG Hao², LIU Shengjie³, SONG Lei¹,
ZHAO Zhizhong^{1*}, PENG Geng^{4,5}

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Luzhong Highway Construction Co., Ltd., Zibo 255086, China;

3. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;

4. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100032, China;

5. Beijing Municipal Road and Bridge Technology Development Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: To improve the dispersion uniformity of cement particles, the influence of power ultrasonic on the rheological properties of cement-based composite materials is studied. Ordinary Portland cement P·O 42.5 is used, with naphthalene-based water reducer FDN-C as the water reducer. Power ultrasonic is employed for pre-dispersion treatment of cement slurry, and the fluidity and bleeding rate of the slurry are tested under different

water-to-cement ratios(0.50, 0.55), ultrasonic powers(250, 500, 750 W), and ultrasonic times(0,1,2,3,4 min) to investigate the impact of power ultrasonic on the rheological properties of cement slurry. The results show that with the same ultrasonic time, the fluidity of the cement slurry increases with the increase of ultrasonic power, while the bleeding rate decreases first and then increases with the increase of ultrasonic power. When the ultrasonic power is 750 W, the fluidity and bleeding rate of cement slurry at different water-to-cement ratios are the highest. With the same ultrasonic power, the fluidity of both water-to-cement ratio cement slurries is the highest after 4 min of ultrasonic treatment. The bleeding rate of the 0.50 water-to-cement ratio slurry decreases, increases, then decreases, and increases again with the increase of ultrasonic time, while for the 0.55 water-to-cement ratio slurry, the bleeding rate continues to increase after 3 min of ultrasonic treatment. Compared to the water reducer, power ultrasonic can change the rheological properties of the cement slurry in a shorter time. The most significant effects on altering the rheological properties of the slurry are observed when the ultrasonic power is 750 W and the ultrasonic time is 2 min, and when the ultrasonic power is 500 W and the ultrasonic time is 4 min.

Keywords: cement-based composite material; power ultrasound; rheological property; fluidity; bleeding rate; water reducing agent

(责任编辑:王惠)

+++++
(上接第 25 页)

industry formed an agglomeration trend along the "slow tour" scenic path in the theme corridors of "Qianli Binhai", "Red Yimeng", and "Lufeng Canal". The coupling coordination degree between the high-speed transportation network and the tourism industry show an inverted U-shaped distribution of high in the south and low in the north and low in the east, and the north-south direction is the primary direction for the spatial differentiation of the coupling coordination degree between the high-speed transportation network and the tourism industry. The coupling coordination between the high-speed transportation network and the tourism industry has spatial agglomeration and significant spatial dependence. Influenced by distance attenuation and siphon effects, the coupling coordination of the edge areas of Provincial Capital Economic Circle and Lunan Economic Circle is relatively weak.

Keywords: high-speed transportation network; advantages of high-speed transportation network; tourism industry development level; coupling coordination

(责任编辑:赵玉真)

+++++
(上接第 30 页)

conditions caused by traffic accidents, microscopic simulation software VISSIM is used to simulate vehicle operation data under both congested and smooth traffic conditions on highways. The vehicle specific power (VSP)-based emission calculation model is employed to compute the exhaust emissions of different vehicle types under these two conditions, and a comparative analysis is performed. The accuracy of the VSP-based emission calculation results is verified using the motor vehicle emission simulator (MOVES). The results show that: under congested conditions, the exhaust emissions of vehicles during acceleration are higher than those during deceleration and idling; The emissions of CO, NO_x, HC, and CO₂ under congested traffic conditions are approximately 1.86, 1.86, 2.15, and 2.01 times higher, respectively, than those under smooth traffic conditions. The emissions under highway traffic accident congestion are significantly higher than under smooth conditions; the calculation results of the two models for the four types of exhaust pollutants are relatively close, with a small relative average deviation.

Keywords: highway; traffic accident; congestion; exhaust emission; microscopic simulation; VSP

(责任编辑:赵玉真)