

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220401001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0154-09

引用格式: 何志勇, 阳洁颖, 邹丽梅. 双卧轴振动搅拌对超高性能混凝土性能的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 154-162.

Citation: HE Zhiyong, YANG Jieying, ZOU Limei. Research on the effect of the double-horizontal-shaft vibrating mixing on the performance of ultra-high performance concrete[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 154-162.

双卧轴振动搅拌对超高性能混凝土性能的影响研究

何志勇¹, 阳洁颖¹, 邹丽梅²

(1. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 柳州职业技术学院, 广西 柳州 545006)

摘要:【目的】以双卧轴振动搅拌机为研究对象, 分别采用仿真和试验方式对比分析振动搅拌对超高性能混凝土材料性能的影响。【方法】首先, 建立双卧轴振动搅拌机三维立体模型; 然后, 将其导入 EDEM 仿真软件进行仿真分析, 在保证所建模型能使物料充分混合的前提下, 设计了一组非振动搅拌与振动搅拌的对比研究, 利用 EDEM 的后处理功能, 对搅拌结束的物料运动轨迹及材料的均匀度随时间的变化规律进行分析; 最后, 通过现场试验测试了成品混合料的力学性能。【结果】仿真结果证明: 在转速相同的情况下, 搅拌结束时振动搅拌方式下混合料的离散系数为 0.186, 非振动搅拌混合料的为 0.247, 振动搅拌使混合料的匀质性提高了 25%。预混料与非预混料的工程试验结果表明: 与非振动搅拌相比, 振动搅拌后混合料的延展性提高了 7.4%~16.2%, 塌落度增大了 3~5 mm, 匀质性提高了 21%。【结论】整体而言, 对于超高性能混凝土的制备, 振动搅拌效果更好。

关键词: 超高性能混凝土; 振动搅拌; EDEM; 仿真分析; 材料性能

中图分类号: TH692.9

文献标志码: A

0 引言

在用搅拌机制备混凝土的过程中, 搅拌叶片通过转动使物料发生混合对流运动与扩散运动。为了提高混凝土质量、节约水泥用量, 通常会采用改进搅拌机的工作机构、选择合适的原材料配合比等方法, 生产出均匀度与抗压强度都较好的混凝土, 以满足工程应用的需求。工程施工要求混凝土必须具备一定的强度、和易性、耐久性等技术性能^[1]。相比自落式搅拌, 双卧轴搅拌机生产效率高, 生产出的混凝土质量更好, 更易达到施工的性能要求。

有研究表明, 双卧轴搅拌机能保证混凝土宏观上的匀质性, 振动搅拌又可以提高混凝土的微观匀质性, 因此把强制搅拌和振动搅拌联合起来是研制新型混凝土搅拌机的一种有效探索^[2-3]。其原理是将振动轴内置在空心搅拌轴中以实现激

振器拌和机构的一体化设计^[3]。为了研究双卧轴非振动搅拌在附加了振动条件之后对超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 均匀度、扩展度、塌落度和搅拌效率的影响, 本研究首先利用 EDEM 仿真软件对搅拌缸内的物料流动进行模拟; 再利用离散系数研究振动对匀质性的影响; 最后, 对 UHPC 预混料与非预混料在振动搅拌与非振动搅拌方式下得到的混凝土样本进行对比试验并分析, 确定制备 UHPC 的最佳方案。

1 双卧轴搅拌装置的振动搅拌机理

在双卧轴搅拌机的研究中, 非振动搅拌机构已基本符合要求, 但搅拌线速度的分布存在一个低效区域, 在该区域物料拌和效果差。而在远离搅拌轴的部分区域物料所受离心力较大, 容易出现离析现象^[4-5]。从搅拌叶片外端到搅拌轴中心搅拌线速度呈线性分布, 且在搅拌叶片接近搅拌

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-04-16; 接受日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005054)

通信作者: 何志勇 (1973—) (0009-0006-9315-0850), 男, 高级工程师, 主要从事筑路、养路机械设计理论等方面的研究。

E-mail: hezhuyong73@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

缸内壁时最大,在搅拌叶片接近搅拌轴中心时最小^[6]。

长期运转后搅拌轴周围会出现结块(混凝土抱轴)现象,这使得搅拌效果变差。有研究表明,宏观上搅拌均匀的混合料,在显微镜下能观察到其中存在的水泥团。为解决团聚现象,使混合料在宏观和微观上保持一致的匀质性,前苏联有关学者在普通搅拌机上采用附加激振器的方法来拌和混合料,并在1937年发明了增加振动搅拌叶片的自落式搅拌机。后来,日、美、德3国开始进行振动搅拌技术的研究,将振动搅拌技术运用在双卧轴搅拌机上^[7]。由于该技术破坏了水泥团的聚合,增强了混合料的流动性,因此混凝土的拌和效果较好。

振动搅拌机与传统搅拌机的主要区别为:振动搅拌机的搅拌轴在做旋转运动的过程中所释放出来的作用力会受到振动的影响,这会促使混合料中的微小颗粒发生振动,并在水与水泥发生水化反应时,破坏水泥之间的黏结力,从而使搅拌缸中的细小颗粒因受力而快速拌和,也加大了外表面混合料由固相转变为液相的速率,从而加快了水化反应。

2 EDEM仿真分析

2.1 双卧轴搅拌装置模型的建立

三维建模设计的双卧轴振动搅拌机是根据几何相似原则对原型机尺寸进行同比例缩小后得到的,即其整体构造都与原型设备相似,而直径、长度和粗糙度等线性尺寸均为同比例缩小后的。双卧轴搅拌装置的三维模型如图1所示。双卧轴搅拌装置的特点是:振动与搅拌机构一体化设计,搅拌叶片边搅拌边振动,有效振动面积和空间大,振动传播的距离近且分布均匀^[8],振动轴内置于空心搅拌轴中,搅拌轴上有2个返回叶片和5个普通叶片。叶片模型如图2~3所示。

从参数优化的角度考虑,搅拌缸的长宽比不宜过大^[9]。设计搅拌缸的公称容积为 $V=320\text{ L}$,缸体半径为 0.42 m ,搅拌轴间距为 0.65 m ,搅拌机壳体宽度、长度、高度分别为 1.30 、 1.28 、 0.84 m 。搅拌叶片的弧线部分是搅拌缸内壁斜切剖面的一段轮廓线,即内椭圆的一段曲线,叶片安装角度取 45° 。为防止叶片卡料,采用间隙 $\delta=5\text{ mm}$ 的变间

隙方式进行叶片装配。在容积利用系数为 0.35 和常用搅拌机尺寸的基础上,设置搅拌臂的长为 0.38 m ,两根空心搅拌轴之间的相位角为 60° 。物料的运动模式为围流运动。在研究过程中,需要注意搅拌机各零件固有频率等的要求。

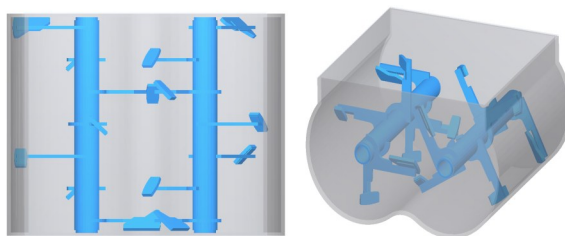


图1 双卧轴搅拌装置的三维模型

Fig. 1 The three-dimensional model of the double-horizontal-shaft mixing device

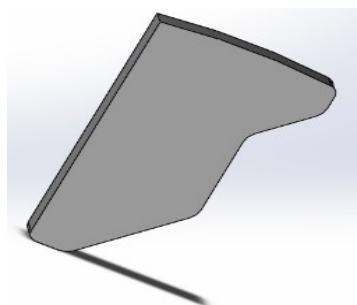


图2 返回叶片

Fig. 2 The reversing blades

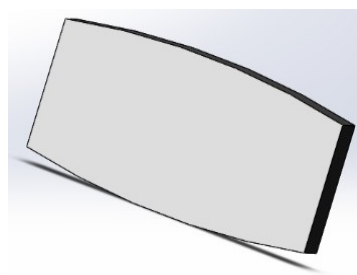


图3 普通叶片

Fig. 3 The ordinary blades

2.2 基于EDEM的仿真分析

2.2.1 模型参数的确定

UHPC具有超高的强度、韧性和耐久性,已成为实现水泥基材料性能大跨越的新体系^[10],其材料的基本组成见表1^[9]。其中,水与胶凝材料的质量比为 $0.14\sim 0.27$,钢纤维的尺寸为 0.2 mm (直径) $\times 12.7\text{ mm}$ (长)。金属纤维可以增强UHPC的动态和准静态力学性能^[11-13]。在EDEM仿真计算中,为减小EDEM的计算量并使计算结果更接近真实情况,需将石英砂、细砂颗粒的尺寸放大150倍。由于UHPC骨料中的石英砂、细砂的最大粒

径为 0.3 mm, 所以模型中骨料颗粒的尺寸应该在 15~45 mm 中选择。通过参考相关文献, 确定此次仿真所用混合料为 5 种粒径的颗粒模型(投料颗粒数根据表 1 中的质量分数计算), 具体设置如下: 代表水泥和硅灰颗粒的粒径为 15 mm, 投料颗粒数为 40 000 个; 代表石英砂和细砂粗骨料颗粒的粒径为 40 mm, 投料颗粒数为 1 000 个; 代表中骨料颗粒的粒径为 30 mm, 投料颗粒数为 5 000 个; 代表细骨料颗粒的粒径为 20 mm, 投料颗粒数为 15 000 个; 代表钢纤维的长条状颗粒的尺寸为 4 mm(直径)×254 mm(长), 投料颗粒数为 200 个。

设定模拟时长为 20 s, 在 0~5 s 内完成水泥、硅灰、石英砂和钢纤维等的投料, 并设置颗粒之间的作用力、材料特性等, 观察不同时刻混合料的混合情况。混合料的物理属性与仿真模拟的接触属性等的设置见表 2~3。

为获得最佳混合度, 需在搅拌时间相同的情况下搅拌物料。根据搅拌机的几何参数, 选取搅拌线速度 $v=1.6$ m/s, 激振频率为 30 Hz, 计算得出搅拌轴的转速为 35 r/min。在本试验中, 骨料粒径

为 5~40 mm, 因骨料的共振频率为 180~240 rad/s, 故选用振幅为 1.2 mm、振动圆频率为 210 rad/s、频率为 33.4 Hz 的激振器, 其振动强度 D 在合理范围内, 能保证机器工作的可靠性。

2.2.2 物料运动与混合均匀度分析

在求解模块下需设置 Rayleigh 时间步长、数据保存间隔和网格大小等计算参数。其中, Fixed time step 指的是从一次计算到下一次计算的时间间隔^[14-15]。在 EDEM 的求解过程中, 一般将仿真的 Rayleigh 时间步长设置为 5%~40%, 以保证仿真的稳定性与准确性^[12]。在本试验中, 将仿真的 Rayleigh 时间步长设置为 30%, 仿真时间设置为 20 s, 数据保存间隔设置为 0.1 s, 网格大小设置为最小骨料颗粒粒径的 4 倍。

为提高仿真效率, 在投料完成之后, 可通过删除颗粒工厂来减小仿真运算量。在仿真结束后, 为便于观察, 将颗粒按照粒径的大小, 由小到大设置成红、黄、蓝、绿 4 种颜色, 并将搅拌机划分成 4×4×4 个网格, 如图 4 所示。

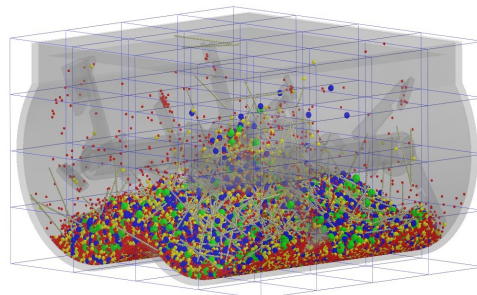


图 4 网格划分

Fig. 4 Grid division

为减少仿真分析的工作量, 选取粒径最小的 15 mm 水泥颗粒的离散系数来评定混合料颗粒混合的均匀度。在搅拌过程中, 搅拌缸内水泥的颗粒总数 n 和混合料的颗粒总数 N 恒定不变, 设达到最优混合度时两者的比值为 σ , 如式(1)所示。假设第 i 个网格内包含的水泥颗粒数为 a_i , 总颗粒数为 A_i , 其比值为 μ_i , 如式(2)所示。在理想情况下, σ 值应与 μ_i 值相等, 水泥颗粒完全混合均匀。可用 μ_i 与 σ 的比值 ε_i 来反映第 i 个网格内水泥颗粒实际混合均匀度与理想值的偏差, 如式(3)所示。将 ε_i 的标准偏差与平均值的比值定义为离散系数 C_v , 离散系数越小, 表示物料混合得越均匀, 如式(4)所示, 其中, S 为有效网格数, $\bar{\varepsilon}$ 为 ε_i 的均值。

$$\sigma = \frac{n}{N} \quad (1)$$

表 1 UHPC 的基本组成

Table 1 The basic composition of UHPC

配料	每 m ³ UHPC 中各物质的质量/kg	质量分数/%
普通水泥(V 型)	700~1 010	27.0~38.0
硅灰	230~320	8.5~9.5
细磨石英砂	0~230	0.0~8.0
细砂	760~1 050	39.0~41.0
钢纤维	150~190	5.5~8.0
高效减水剂	15~25	0.5~1.0
水	155~210	5.5~8.0

表 2 材料的物理属性

Table 2 Physical performance of materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/Pa	泊松比
钢	7 850	7×10^{10}	0.30
水泥	1 400	2×10^9	0.25
骨料	1 400	3×10^{10}	0.25
钢纤维	7 800	2×10^{11}	0.25

表 3 仿真模拟的接触属性

Table 3 Simulation contact performances

材料接触对	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
骨料-骨料	0.7	0.30	0.020
骨料-钢	0.6	0.20	0.030
水泥-水泥	0.7	0.30	0.010
水泥-钢	0.5	0.10	0.025
水泥-骨料	0.8	0.35	0.015

$$\mu_i = \frac{a_i}{A_i} \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\mu_i}{\sigma} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=1}^S (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}}{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \varepsilon_i} \quad (4)$$

1) 振动搅拌与非振动搅拌的仿真对比。

为比较振动搅拌与非振动搅拌的效果,本试验通过仿真得到水泥颗粒离散系数的对比结果:从第6秒开始,每隔2 s导出每个网格内不同粒径水泥颗粒的数目与混合料总颗粒数目;计算出粒径为15 mm的水泥颗粒所对应的离散系数,如图5所示。

从图5的变化趋势来看,随着时间的延长,两种搅拌方式的离散系数均有所下降。振动搅拌方式下水泥颗粒的离散系数在第8秒时已接近0.400,而非振动搅拌方式下水泥颗粒的离散系数在14 s后才降到0.4,仿真时间缩短了约6 s;在第20秒时,振动搅拌方式下水泥颗粒的离散系数为0.186,非振动搅拌方式下其值为0.247,两者相差0.061,振动搅拌方式下混合料的匀质性提高了25%,证明在振动搅拌过程中,物料之间的交叉运动更剧烈,混凝土在振动搅拌下的匀质性比非振动搅拌下的更好,且振动搅拌的效率更高。

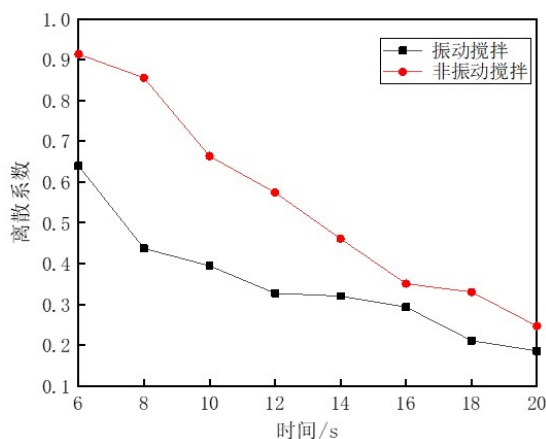


图5 振动搅拌与非振动搅拌的离散系数对比

Fig. 5 The comparison of dispersion coefficients between vibrating mixing and non-vibrating mixing

2) 颗粒运动轨迹流线图。

在EDEM软件的后处理过程中,为验证振动搅拌过程中离散系数的提高是加速的颗粒交叉运动造成的这一结论,需对混合料颗粒运动轨迹流

线图进行研究。在振动搅拌的20 s仿真时间内,任意选取粒径为15 mm水泥颗粒的搅拌流线图,观察混合料流动过程中搅拌阻力的变化。仿真时间为20 s时的流线俯视图与主视图如图6~7所示。

从图6~7可以看出,在混合料搅拌过程中,颗粒在叶片的强制作用下产生圆周运动、径向运动和轴向运动,并在径向与轴向都发生了位置变化。图6~7所示的流线图与混合料的运动情况相符,但并不能反映出1.2 mm振幅的振动搅拌效果,故仍需进行力学性能试验来确定振动的搅拌效果。

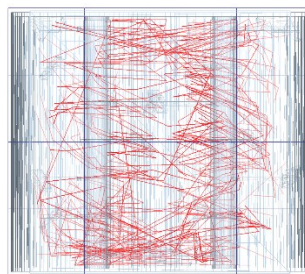


图6 粒径为15 mm颗粒的流线俯视图

Fig. 6 The vertical view of streamlines of 15 mm particles

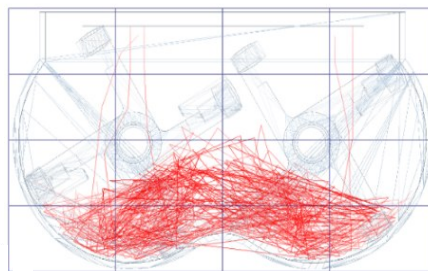


图7 粒径为15 mm颗粒的流线主视图

Fig. 7 The front view of streamlines of 15 mm particles

2.2.3 预混料与非预混料的仿真对比

UHPC预混料是用水泥、硅灰、石英砂按颗粒级配和性能要求配制而成的一种混合料。由于干混均匀的基体颗粒混合料在投入搅拌缸前就已经搅拌均匀,故在预混料倒入搅拌缸后可直接加入钢纤维进行搅拌。UHPC非预混料是指各物料在投入搅拌缸之前单独存放,在搅拌前期投入水泥、硅灰与石英砂,搅拌一段时间后再投入钢纤维继续搅拌。

在振动搅拌方式下,在EDEM软件中进行预混料与非预混料的搅拌对比试验。考虑到计算量,仿真时间不宜过长,例如,在实际试验中,应在加入非预混料搅拌3~4 min后再加入钢纤维,而在EDEM中,为减少计算量,设定无钢纤维的非预混料的搅拌时长为3 s。

在仿真对比试验中,UHPC预混料是在1 s内投入搅拌桶内,然后同时加入钢纤维,在第3秒时使用JKR模型进行搅拌的;UHPC非预混料是将水泥、硅灰、石英砂级配料在1 s内投入搅拌缸,先搅拌3 s,然后加入钢纤维,再引入JKR模型进行搅拌的。选取最小粒径15 mm的颗粒的离散系数来进行对比,结果如图8所示。

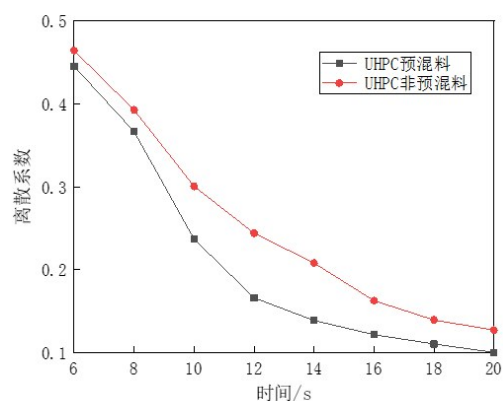


图8 预混料与非预混料的离散系数对比

Fig. 8 The comparison of the dispersion coefficient of premixing materials and non-premixing materials

由图8可知,UHPC预混料的离散系数在第12秒时已降到0.160,而非预混料在第16秒才降到0.160,UHPC预混料的仿真时间缩短了4 s。在搅拌结束时,UHPC预混料的离散系数为0.100,非预混料的为0.127,UHPC预混料的匀质性提高了21%,证明对先期搅拌好的UHPC预混料进行振动搅拌更有利于颗粒的混合,进而使混合料的匀质性更好。

3 试验研究

为验证仿真分析的结果,本研究在不同搅拌条件下对UHPC预混料和非预混料的搅拌效果进行了4次对比试验,结果见表4~7。每次加入的UHPC干混料的总质量为40 kg,水的质量为3.48 kg。在加入混合料时有干搅拌停机与干搅拌不停机两种情况。选择扩展度最好的混合料制作抗压强度试件,测定混凝土试件在硬化14 d后的力学性能。

表4 UHPC预混料振动搅拌试验结果

Table 4 The test results of UHPC premixing materials in the condition of vibrating mixing

搅拌时间/s	加干混料/kg	加水/kg	扩展度	塌落度/mm	备注
0	40				加料后加钢纤维
20		3.48			加水、不停机
90			650 mm×580 mm	270	
110			710 mm×695 mm	275	
140			725 mm×705 mm	280	取样

表5 UHPC预混料非振动搅拌试验结果

Table 5 The test results of UHPC premixing materials in the condition of non-vibrating mixing

搅拌时间/s	加干混料/kg	加水/kg	扩展度	塌落度/mm	备注
0	40				加料后加钢纤维
20		3.48			加水、不停机
90			475 mm×450 mm	245	
110			605 mm×600 mm	270	
140			710 mm×670 mm	277	取样

表6 UHPC非预混料振动搅拌试验结果

Table 6 The test results of UHPC non-premixing materials in the condition of vibrating mixing

搅拌时间/s	加干混料/kg	加水/kg	扩展度	塌落度/mm	备注
0	40	3.48			加料后立即加水
60					目测流化
80					加钢纤维
140			535 mm×520 mm	260	
185			620 mm×580 mm	275	
245			720 mm×630 mm	280	取样

表7 UHPC非预混料非振动搅拌试验结果

Table 7 The test results of UHPC non-premixing materials in the condition of non-vibrating mixing

搅拌时间/s	加干混料/kg	加水/kg	扩展度	塌落度/mm	备注
0	40	3.48			加料后立即加水
60					目测流化
80					加钢纤维
140			470 mm×470 mm	240	
185			590 mm×580 mm	270	
245			640 mm×610 mm	275	取样

分析表4~5可知,对于UHPC预混料,随着搅拌时间的增加,混合料的扩展度和塌落度都在增加,但振动搅拌方式下增加速度更快。搅拌结束时,振动搅拌混合料的扩展度为725 mm×705 mm,非振动搅拌混合料的为710 mm×670 mm。相比较而言,振动搅拌混合料的扩展面积增大了35 425 mm²,延展性提高了7.4%,塌落度增大了3 mm,说明振动搅拌预混料的均匀度更高,流动性更好。

分析表6~7可知,对于UHPC非预混料,随着搅拌时间的增加,混合料的扩展度和塌落度也都在增加,但振动搅拌的增加速度更快。搅拌结束时,振动搅拌混合料的扩展度为720 mm×630 mm,非振动搅拌混合料的为640 mm×610 mm。相比较而言,振动搅拌混合料的扩展面积增大了63 200 mm²,延展性提高了16.2%,塌落度增大了5 mm,预混料的搅拌效果与非预混料的基本一致。

非预混料的试验样本如图9~10所示。从图9~10可以看出,振动搅拌的混凝土目测无任何气泡,无结团现象,流动性较好,而非振动搅拌的混凝土明显偏干,且表面不平。



图9 非预混料振动搅拌试验样本

Fig. 9 The test specimen of non-premixing materials in the condition of vibrating mixing



图10 非预混料非振动搅拌试验样本

Fig. 10 The test specimen of non-premixing materials in the condition of non-vibrating mixing

3.1 钢纤维匀质性试验

钢纤维能在一定程度上提高UHPC结构物的抗压强度、抗弯强度、冲击韧性等,且可以降低结构孔隙率,提高结构抗裂性。但由于钢纤维长径比较大、外表粗糙,所以在搅拌过程中易结团,易分布不均,从而影响UHPC结构物的整体性能。因此,需对其成品混合料进行试验,即通过水洗、强磁筛选及烘干得到混合料中的钢纤维,检测其分布的匀质性,结果见表8。

表8 钢纤维匀质性试验结果

Table 8 The test results of steel fibers on uniformity

类型	取样数量/L	钢纤维实际含量/g	钢纤维标准含量/g	误差/g
预混料振动搅拌	3	600	598	+2
预混料非振动搅拌	3	577	598	-21
非预混料振动搅拌	3	592	598	-6
非预混料非振动搅拌	3	613	598	+15

试验数据表明,无论是预混料还是非预混料,采用振动搅拌方式的混合料的钢纤维含量误差较小,钢纤维的分布更均匀,这有利于提高混凝土的力学性能。与上述仿真结果对比后发现,振动搅拌混凝土的离散系数比非振动搅拌的更小,匀质性更好。

3.2 UHPC的力学性能检测

在试验材料配合比与搅拌工况满足试验要求的统一条件下,为排除设备性能不稳定造成的误差,使结果可靠,本研究对采用不同搅拌方式的试件连续测试3组。经蒸汽养护后的100 mm×100 mm样本的力学性能检测结果见表9。

从表9可以看出,试件抗压强度和抗折强度检测结果均超过了UHPC的最低要求,即150、25 MPa。其中,预混料的试验结果表明,振动搅拌的抗压强度与抗折强度分别为188.3、30.98 MPa,非振动搅拌的分别为175.6、28.63 MPa,振动搅拌的抗压强度与抗折强度比非振动搅拌的分别大了

7.2%和8.2%;非预混料的试验结果表明,振动搅拌的抗压强度与抗折强度分别为183.3、29.63 MPa,非振动搅拌的分别为162.6、27.34 MPa,振动搅拌的抗压强度与抗折强度比非振动搅拌的分别

大了12.7%和8.4%。由此可知,无论是预混料还是非预混料,在振动搅拌下混合料的孔隙率更小,材料分布得更均匀,混凝土的抗压强度和抗折强度等力学性能也得到明显提高^[16-18]。

表9 UHPC力学性能检测结果

Table 9 The test results of mechanical performance of UHPC

类型	抗压力/kN	抗压强度/MPa	抗压强度代表值/MPa	抗折力/kN	抗折强度/MPa	抗折强度代表值/MPa
预混料振动搅拌	1 878.2	187.8	188.3	121.04	36.31	30.98
	1 835.4	183.5		87.90	26.37	
	1 936.7	193.7		100.91	30.27	
预混料非振动搅拌	1 798.9	179.9	175.6	106.40	31.92	28.63
	1 685.2	168.5		95.41	28.62	
	1 784.1	178.4		84.53	25.36	
非预混料振动搅拌	1 855.0	185.5	183.3	114.16	34.25	29.63
	1 774.1	177.4		88.14	26.44	
	1 868.7	186.9		93.96	28.19	
非预混料非振动搅拌	1 662.9	166.3	162.6	95.39	28.62	27.34
	1 510.5	151.1		85.08	25.52	
	1 704.9	170.5		92.91	27.87	

UHPC结构物的力学性能。

4 结论

本研究采用EDEM仿真软件分析了双卧轴搅拌方式下的物料混合过程,研究控制变量对搅拌性能的影响,最后通过试验对搅拌性能进行了验证。主要结论如下:

1) 基于EDEM离散元软件的模拟仿真结果表明,对于最小颗粒粒径为15 mm的混合料,在第20秒时振动搅拌方式下的离散系数为0.186,比非振动搅拌方式下的要小,证明振动搅拌的混合料比非振动搅拌的混合料的匀质性要好。

2) 在振动搅拌方式下,在20 s的振动搅拌时间结束时,预混料与非预混料的离散系数分别为0.100和0.127,预混料的匀质性的非预混料的提高了21%,说明对事先搅拌好的UHPC预混料进行振动搅拌有利于混合料颗粒的混合,可以使混合料的匀质性更好。

3) 对比试验结果显示,相较于非振动搅拌,振动搅拌预混料所得成品料的延展性提高了7.4%,塌落度增加了3 mm,抗压强度与抗折强度分别提高了7.2%和8.2%;振动搅拌非预混料所得成品料的延展性提高了16.2%,塌落度增大了5 mm,抗压强度与抗折强度分别提高了12.7%和8.4%,说明振动搅拌使混合料更均匀,流动性更好,能提高

[参考文献]

- [1] 张宏. 基于离散元法的双卧轴搅拌机工作性能的分析与研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(12): 68-73, 100.
ZHANG Hong. Analysis and research on working performance of double horizontal shaft mixer based on discrete element method [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(12): 68-73, 100.
- [2] 张胜军, 芦强. 双卧轴搅拌机搅拌速度对均匀度影响的研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(1): 31-34. DOI: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2022.01.009.
ZHANG Shengjun, LU Qiang. Study on the effect of mixing speed on uniformity of the double horizontal shaft mixer [J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(1): 31-34. DOI: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2022.01.009.
- [3] 张良奇, 冯忠绪, 赵利军. 1 m³双卧轴混凝土振动搅拌机的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(2): 250-255. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2013.02.030.
ZHANG Liangqi, FENG Zhongxu, ZHAO Lijun. Test study of 1 m³ vibratory concrete mixer with double-horizontal shafts [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2013, 38(2): 250-255. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2013.02.030.
- [4] 黄天勇, 陈旭峰, 李胜, 等. 振动搅拌对混凝土性能的影响及其应用前景分析[J]. 混凝土, 2020(1):

- 123-126. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2020.01.028.
HUANG Tianyong, CHEN Xufeng, LI Sheng, et al. Application prospect and influence of vibratory mixing on performance of concrete [J]. Concrete, 2020 (1): 123-126. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2020.01.028.
- [5] 罗丹, 刘慧明. 稳定土振动搅拌机搅拌装置振动特性分析[J]. 机械设计与制造, 2021(8): 144-148. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.08.034.
LUO Dan, LIU Huiming. Analysis of vibration characteristics of mixing device of stabilized soil vibratory mixer [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021 (8): 144-148. DOI: 10.19356/j. cnki. 1001-3997.2021.08.034.
- [6] 赵悟, 岳超, 沈威威. 双立轴振动搅拌机搅拌机构有限元分析与结构优化[J]. 机械强度, 2020, 42(6): 1496-1502. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.06.032.
ZHAO Wu, YUE Chao, SHEN Weiwei. Finite element simulation and structure optimization of the agitating mechanism of double shaft vibrating mixer [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (6): 1496-1502. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.06.032.
- [7] 赵利军, 张磊, 冯忠绪. 混凝土振动搅拌合理激振方式研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 51-54.
ZHAO Lijun, ZHANG Lei, FENG Zhongxu. Research on the rational vibration mode for vibratory mixing concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 51-54.
- [8] 冯忠绪, 王卫中, 姚运仕, 等. 搅拌机合理转速研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 116-120. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.02.021.
FENG Zhongxu, WANG Weizhong, YAO Yunshi, et al. Study of mixer rational rotation speed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 116-120. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.02.021.
- [9] 孙鑫, 张志峰, 薄华涛. 双卧轴振动搅拌机的振动特性测试及分析[J]. 建筑机械, 2019(12): 53-56. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2019.12.004.
SUN Xin, ZHANG Zhifeng, BO Huatao. Test analysis of vibration characteristics for double horizontal shaft vibrating mixer [J]. Construction Machinery, 2019(12): 53-56. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2019.12.004.
- [10] 张建, 毛倩瑾, 王子明, 等. 减缩型聚羧酸减水剂提高混凝土早期抗裂性的作用研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3359-3365. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2021.10.022.
ZHANG Jian, MAO Qianjin, WANG Ziming, et al. Improving early crack resistance of concrete by shrinkage-reducing polycarboxylate superplasticizer [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (10): 3359-3365. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2021.10.022.
- [11] HE Z Y, WANG T. Optimal design of the key structure of planetary concrete mixers based on EDEM [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2021, 62 (4): 295. DOI: 10.1504/ijmpt.2021.115830.
- [12] AGHDASI P, HEID A E, CHAO S H. Developing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for large-scale structural applications [J]. ACI Materials Journal, 2016, 113 (5): 559-570. DOI: 10.14359/51689103.
- [13] 刘韡, 郭银波. 基于ABAQUS对钢纤维混凝土界面强度分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(5): 65-72, 99. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.05.008.
LIU Wei, GUO Yinbo. Analysis on interfacial strength of steel fiber reinforced concrete based on ABAQUS [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (5): 65-72, 99. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.05.008.
- [14] KARA I F, KÖROĞLU M A, ASHOUR A F. Tests of continuous concrete slabs reinforced with basalt fiber-reinforced plastic bars [J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(5): 1201-1213. DOI: 10.14359/51689784.
- [15] NASRIN S, IBRAHIM A. Finite-element modeling of UHPC hybrid bridge deck connections [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2018, 10(3): 199-210. DOI: 10.1007/s40091-018-0192-2.
- [16] 马艳霞, 聂思凡, 郭佳庆. 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
MA Yanxia, NIE Sifan, GUO Jiaqing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (1): 64-72. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.2022.01.008.
- [17] 彭能立, 谭仕敏, 朱继华, 等. 湖南省建筑材料用砂石骨料资源开发利用现状及建议[J]. 国土资源导刊, 2022, 19 (3): 51-56. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-5603.2022.03.011.
PENG Nengli, TAN Shimin, ZHU Jihua, et al. Status and suggestions on exploitation and utilization of sandstone aggregate in Hunan Province [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(3): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2022.03.011.
- [18] 梁睿, 李传习, 聂洁, 等. 混杂纤维超高性能混凝土断裂性能研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 43-54. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.004.
LIANG Rui, LI Chuanxi, NIE Jie, et al. Research on fracture toughness of hybrid-fiber ultra-high

performance concrete with steel fiber and different synthetic fibers [J]. Journal of Transport Science and

Engineering, 2022, 38(1): 43–54. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.004.

Research on the effect of the double-horizontal-shaft vibrating mixing on the performance of ultra-high performance concrete

HE Zhiyong¹, YANG Jieying¹, ZOU Limei²

(1. College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Liuzhou Vocational & Technical College, Liuzhou 545006, China)

Abstract: [Purposes] In this paper, the impact of vibratory agitation on the properties of ultra-high-performance concrete materials is compared and analyzed by simulation and experimental methods. [Methods] First of all, the three-dimensional model of the double-horizontal shaft vibratory mixer is established. Then, the EDEM simulation software is introduced for simulation analysis. Under the premise of ensuring that the model can make the material fully mixed, a set of non-vibration stirring and vibration stirring are designed to comparison and study. With the post-processing function of EDEM, the material movement trajectory and material uniformity at the end of the mixing are analyzed with time. Finally, physical properties of the blended material are tested through field tests. [Findings] Based on the same speed, simulation results show that the blended material dispersion coefficient of vibratory stirring is 0.186 and the non-vibration stirring is 0.247 at the end of production, and the uniformity of the mixture is improved by 25%. Comparing with the non-vibratory stirring, the engineering test results of the premix and the non-premix show that the expansion degree is increased by 7.4%–16.2%, the collapse degree is increased by 3–5 mm, and the uniformity is increased by 21%. [Conclusions] Overall, the vibration stirring effect is better for ultra-high performance concrete preparation.

Key words: ultra-high performance concrete; vibrating mixing; EDEM; simulation analysis; material property

Manuscript received: 2022-04-01; **revised:** 2022-04-16; **accepted:** 2022-04-19

Foundation item: Project (52005054) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: HE Zhiyong(1973—)(0009-0006-9315-0850), male, senior engineer, research interest: design theory of road building and road maintenance machinery. E-mail: hezhiyong73@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:彭卓寅)