

基于EDEM的混凝土物料搅拌分析

鲁 凯, 张成海, 董兴亮, 刘 学

中建八局第一建设有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2022年7月21日; 录用日期: 2022年8月1日; 发布日期: 2022年8月12日

摘 要

建立了水凝混凝土立式搅拌机三维模型, 在EDEM软件中对其材料参数、接触参数、全局变量、运动参数以及求解器等进行设置。通过离散元仿真对混凝土物料的运动特性、搅拌均匀度进行了分析。正交实验得出搅拌机搅拌参数最佳组合为铲板安装角 45° 、搅拌速度35 rpm、充盈率0.4时, 混凝土的搅拌效果最好, 为立式搅拌机的设计生产提供了参考。

关键词

立式搅拌机, 离散元分析, 搅拌参数组合, 正交实验

Analysis of Concrete Material Mixing Based on EDEM

Kai Lu, Chenghai Zhang, Xingliang Dong, Xue Liu

China Construction Eighth Engineering Bureau First Construction Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Jul. 21st, 2022; accepted: Aug. 1st, 2022; published: Aug. 12th, 2022

Abstract

The three-dimensional model of the hydraulic concrete vertical mixer was established, and its material parameters, contact parameters, global variables, motion parameters and solver were set in EDEM software. The motion characteristics and mixing uniformity of concrete materials were analyzed by discrete element simulation. The orthogonal experiment shows that the best combination of mixer mixing parameters was when the shovel plate installation angle is 45° , the mixing speed is 35 rpm, and the filling ratio is 0.4, which provides a reference for the design and production of the vertical mixer.

Keywords

Vertical Mixer, Discrete Element Analysis, Mixing Parameter Combination, Orthogonal Experiment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土的性能除了和其原材料组成及制备工艺相关, 还和搅拌设备有关。骨料混合的均匀性反应了混凝土性能的好坏, 而混凝土搅拌机作为使混凝土骨料均匀混合的关键设备, 其结构和搅拌关键参数直接影响混凝土的性能和生产效率。由于混凝土搅拌过程十分复杂, 伴随着物理变化和化学变化, 同时涉及到流体力学, 因此很难建立一个较为理想的数学模型来分析骨料的运动过程。作为一款专业的散体物料的仿真分析软件, EDEM 几乎可以模拟任何材料, 包括不同形状、不同大小、干燥或粘性等材料类型, 已广泛应用于物料混合和破碎、颗粒的损伤和磨损、热和质量的传递、粘性和塑性力学、干-湿固体的压实等, 因此本文将基于 EDEM 软件对混凝土物料搅拌进行仿真分析, 研究搅拌机结构及运动参数对混凝土性能的影响。

混凝土搅拌机最早由法国工程师在十九世纪八十年代设计[1], 发展至今其主体结构形式已基本固定, 目前相关的研究主要集中在如何得到较好的搅拌机搅拌参数来提高混凝土搅拌均匀度。

Ferraris C F 等人通过试验说明了混凝土搅拌的均匀性可以通过抗压强度等宏观指标来衡量[2]。Sen M 等人利用离散元方法建立了混凝土搅拌过程的离散元模型, 通过实验证实了离散元模型的可行性[3]。Deng X M 等设计了三种不同的投料顺序研究混凝土骨料的投料顺序对混凝土性能的影响, 结果表明投料顺序会对混凝土的塌落度产生影响, 但对抗压强度和孔径分布几乎没有影响[4]。Dils J 等人研究了不同的搅拌机类型、搅拌时间、搅拌速度、减水剂添加时间、气压等因素对混凝土性能的影响[5]。Snoi R K 等人尝试在鼓式搅拌缸内增加挡板, 使中心处的物料脱离搅拌低效区, 结果表明该方法有效[6]。尹小琴等运用流体力学证明叶片理论合理安装角与叶片形状有关[7]。郭良等采用离散元的方法对双立轴振动搅拌机的搅拌过程进行了仿真分析, 利用离散系数来表示骨料混合的均匀性[8]。廖泽楚等人利用离散元的方法研究了螺带式混凝土搅拌机的混合特点, 仿真发现, 填料方式对搅拌机的整体混合效率基本没有影响, 但存在搅拌缸上部区域物料的混合效率比底部高的情况, 若采用舍弃底部搅拌盲区处混凝土的方法, 混凝土的性能会有所提高[9]。王玄丰等人利用 EDEM 软件对比研究了双立轴搅拌机在搅拌缸不同倾角情况下的搅拌性能。仿真发现: 当搅拌缸的倾角为 45° 时, 物料的运动情况更加复杂, 骨料与骨料之间的相对运动更加充分, 搅拌的整体均匀性较好[10]。

大量研究表明, 混凝土的搅拌过程十分复杂, 传统的数学模型难以准确描述搅拌特性, 而实验的方法侧重于对搅拌结果的研究, 且实验周期长、成本高, EDEM 能较为准确地模拟混凝土的搅拌过程。因此, 本文将基于 EDEM 仿真分析, 最佳立式搅拌机的搅拌参数最佳组合。

2. 立式搅拌机几何模型的建立

由于搅拌机结构的复杂性, 在 EDEM 中进行几何体建模相对困难, 因此采用三维建模软件 CREO 进行虚拟样机的建模, 然后将几何体模型导入到 EDEM 中。考虑到后续的试验验证和尽可能保证仿

真的准确性,采用某企业现有的立轴搅拌机作为研究对象,对其建立 1:1 的虚拟样机三维模型。同时为了提高仿真计算速度,在 EDEM 仿真时,将搅拌机结构中对仿真结果没有实质影响的零部件略去,仅保留所需要的部分,经过处理后的搅拌机几何模型如图 1 所示,将该模型导入 EDEM 内进行搅拌仿真。

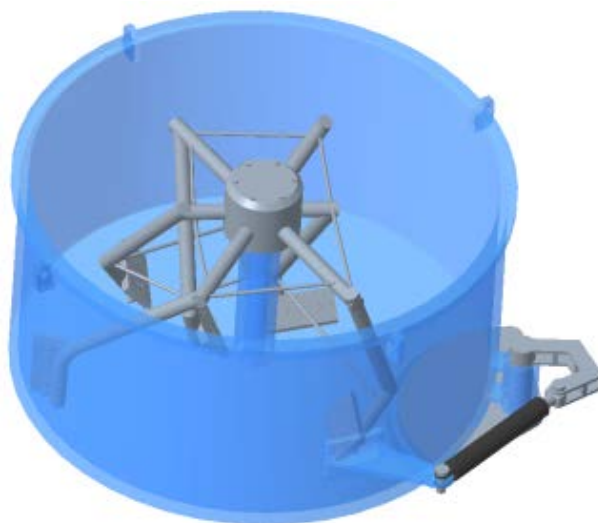


Figure 1. Simplified three-dimensional model of vertical mixer
图 1. 简化后的立式搅拌机三维模型

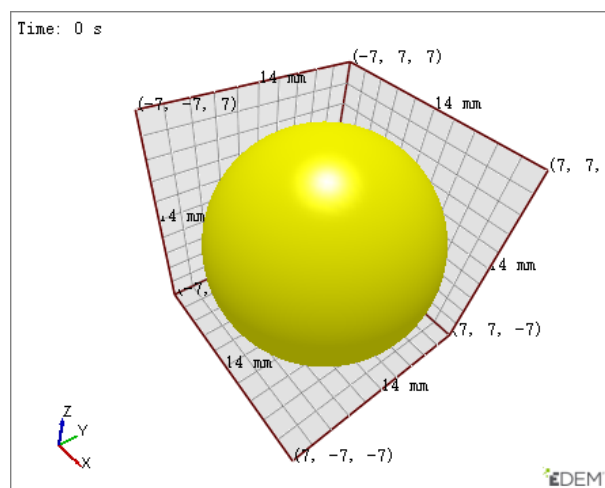


Figure 2. Particle morphology of aggregate
图 2. 集料的颗粒形态

3. 仿真分析参数的设置

3.1. 材料参数的设置

仿真系统需要分别定义颗粒和几何设备的材料属性。其中,颗粒材料共有四种,分别是水泥、粉料、细集料和粗集料。颗粒材料的定义包含颗粒形状大小和材料的固有属性两个方面,其中固有属性是指材料的泊松比、密度和剪切模量。设备的材料定义只需定义其材料属性。为减少计算时间,水泥、粉料和细集料的物料形状使用 EDEM 软件中默认的球型颗粒,如图 2 所示。另需要说明的是,仿真中

的物料粒径存在不同程度的放大, 因为真实的物料粒径过小, 如不进行放大粒径处理, 仿真所需的颗粒数目庞大, 计算机的计算时间和数据存储空间都会极大的增加。参考现有的相关文献, 粒径的放大不会影响对搅拌机搅拌性能的研究, 因此设置水泥材料的颗粒半径为 7 mm、粉料材料的颗粒半径为 4 mm、细集料的颗粒半径为 16 mm、粗集料的颗粒半径为 40 mm。颗粒和几何设备的相关材料参数如表 1 所示。

Table 1. Material parameter properties
表 1. 材料参数属性

材料种类	泊松比	密度(kg/m ³)	剪切模量(Pa)
水泥	0.25	1450	3e+08
粉料	0.25	1200	3e+08
细集料	0.25	1350	3.5e+08
粗纤维	0.25	1350	3.5e+08
钢	0.3	7850	1e+10

3.2. 接触参数设置

接触参数设置包括含颗粒与颗粒之间的接触力学模型的设置, 即接触模型的设置, 以及颗粒与颗粒之间的接触系数、颗粒与几何体之间的接触系数。

3.2.1. 接触模型

混凝土骨料的搅拌存在“干拌”和“湿拌”两种搅拌状态, “干拌”时采用常用的 Hertz-Mindlin with no slip 接触模型。但“湿拌”时由于 EDEM 中并不能直接添加水分, 因此在仿真湿拌时, 采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型, 该模型通过设置颗粒表面的表面能来模拟颗粒的含水量, 进而得到颗粒之间的粘结力, 各个颗粒的表面能设置值为颗粒直径的大小。仿真过程中, “干拌”和“湿拌”时的接触模型选择如图 3 和图 4 所示。

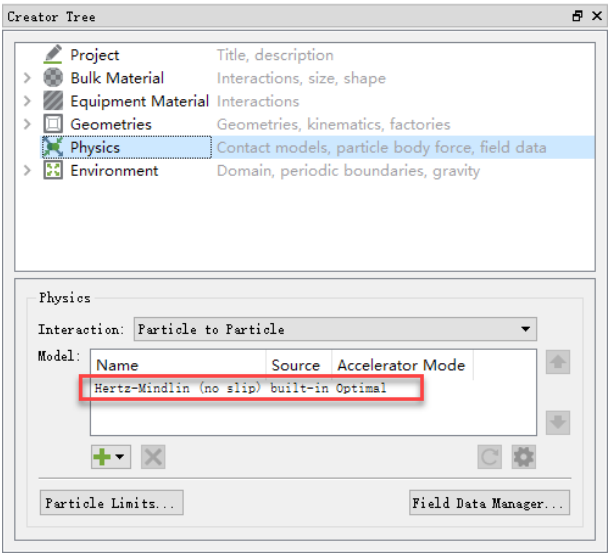


Figure 3. Contact model in “dry mixing”
图 3. “干拌”时的接触模型

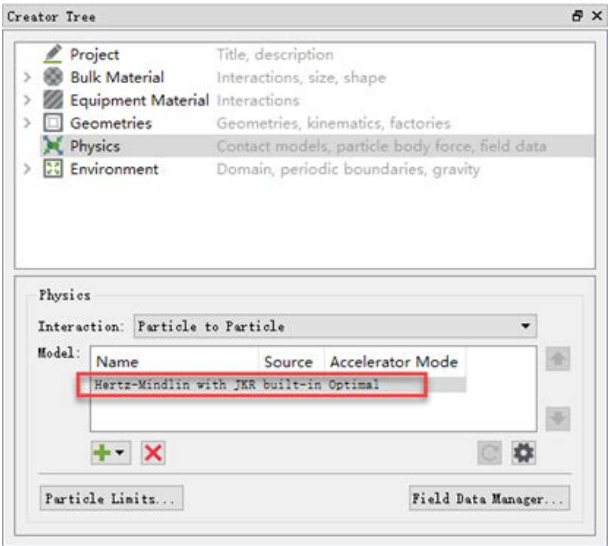


Figure 4. Contact model in “wet mixing”
图 4. “湿拌”时的接触模型

3.2.2. 接触系数

接触参数是指颗粒与颗粒之间、颗粒与几何体之间的恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数。通常情况下，这些接触系数无法通过经验值和相关实验来测得，因为摩擦系数和材料的形状、湿度和材质关联性较大，而仿真中骨料全部采用球型颗粒，实际中物料的形状是不规则的，因此接触系数并不能采用真实状态下的值，需要通过虚拟参数标定实验来获得。其中，恢复系数可通过自由下落实验测得、颗粒与几何体之间的摩擦系数可通过滑板实验测得、颗粒与颗粒之间的摩擦系数可以通过塌落实验和堆积角实验获得。

经过大量的虚拟实验后，得到了与真实物料搅拌状态较为接近的接触参数值，设置各个材料之间的接触系数如表 2 所示。

Table 2. Material parameter properties
表 2. 材料参数属性

材料种类	泊松比	密度(kg/m ³)	剪切模量(Pa)
水泥 - 水泥	0.05	0.7	0.2
水泥 - 粉料	0.05	0.75	0.25
水泥 - 细骨料	0.015	0.7	0.2
水泥 - 粗骨料	0.015	0.7	0.2
水泥 - 几何体	0.05	0.65	0.25
粉料 - 粉料	0.015	0.7	0.25
粉料 - 细骨料	0.05	0.65	0.2
粉料 - 粗骨料	0.05	0.65	0.2
粉料 - 几何体	0.05	0.7	0.3
细骨料 - 细骨料	0.05	0.65	0.25
细骨料 - 粗骨料	0.05	0.65	0.25
细骨料 - 几何体	0.1	0.65	0.25
粗骨料 - 粗骨料	0.3	0.5	0.5
粗骨料 - 几何体	0.5	0.5	0.5
几何体 - 几何体	0.5	0.5	0.5

另外，由于实际中的同种物料的粒径并不是完全相同的，因此在颗粒工厂生成颗粒时，除粗骨料外的其他颗粒粒径设置为在初始值的 0.9~1.1 倍之间随机生成。同时，为了缩短仿真时间，投料时给定颗粒的初始速度为 0.5 m/s，方向沿-Z 轴竖直向下，以使颗粒尽快脱离颗粒工厂，从而减小计算机在颗粒生成阶段仿真的计算量。

3.3. 其他参数设置

其他参数设置包括全局变量设置、搅拌装置的运动参数设置、以及求解器的设置。

全局变量是指仿真系统的重力加速度方向，搅拌机的几何模型在三维软件 CREO 中已经根据 EDEM 中的坐标系习惯新建了相应的坐标系，另存为 STP 格式时坐标系选择新建的坐标系，则导入 EDEM 中后，几何体的显示符合一般的观察视角，如图 5 所示，Z 轴与搅拌轴重合，设置仿真系统的重力加速度为 9.8 m/s^2 ，方向沿-Z 轴方向。

运动参数的设置仅需对搅拌装置进行设置，以搅拌轴转速为 30 rpm 为例，设置搅拌装置的转动中心轴起点坐标为，终点坐标为，转速设置为 30 rpm，加速度为 0，如图 5 所示，其运动起始时间的设置根据投料顺序的不同而不同。

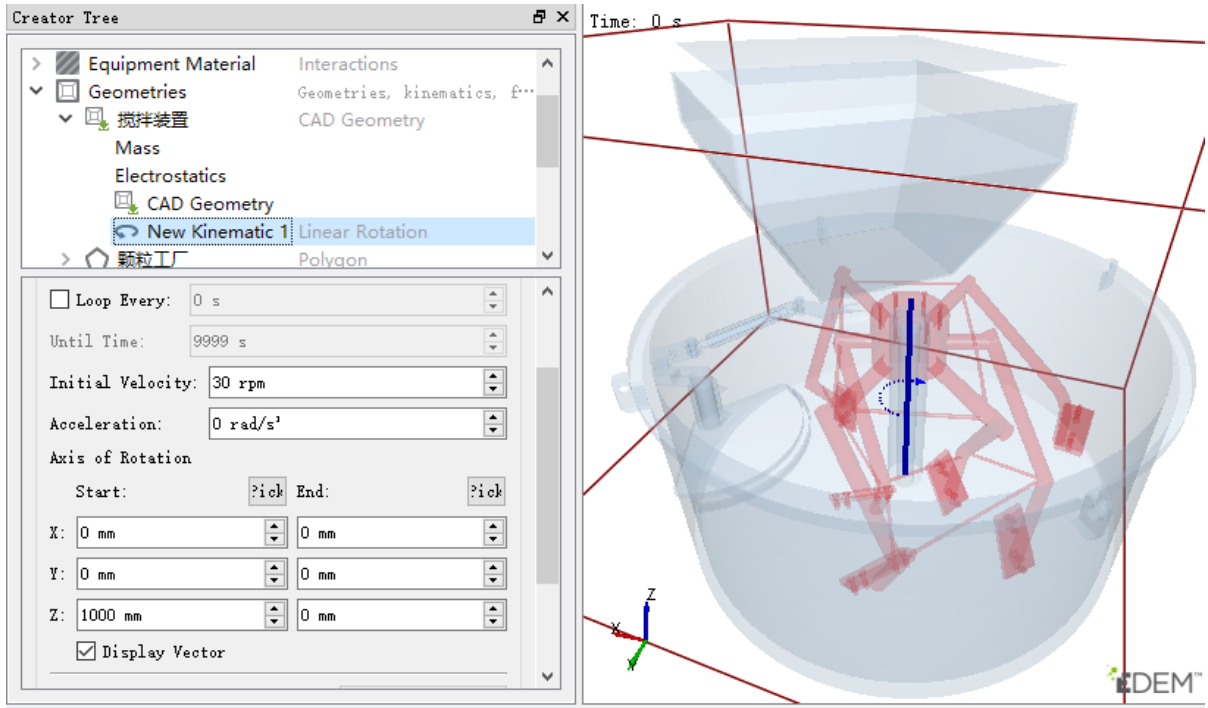


Figure 5. Motion parameter setting
图 5. 运动参数设置

求解器的设置中包含仿真时间、仿真时间步长、仿真数据保存时间间隔以及多核使用。仿真时间设置为 40 s，其中 10 s 为投料时间，根据投料顺序的不同，投料的时间顺序也有所不同。在 EDEM 中，程序根据颗粒的大小、密度和弹性模型的等参数会自动计算出瑞利时间步长。仿真所需要的固定时间步长一般设为瑞利时间步长的 20%~30%。该值越小，数值计算越稳定，仿真所需的时间也越长，但如果固定时间步长设置的过大，一个时间步长计算结束后，颗粒之间碰撞后的能量相对增大，可能会出现颗粒“爆炸”或穿过几何体的现象。经过实际测试后，定义本文仿真的固定时间步长为瑞利时间步长的 10%，实

验表明,该时间步长下仿真的稳定性和仿真时间较好。多核使用可根据计算机的 CPU 个数进行设定,核数使用越高,计算速度越快。

4. 仿真分析

以上参数设置完成后,即可运行仿真。仿真计算时关闭自动更新和颗粒显示可以显著提高仿真计算速度。

4.1. 物料运动特性分析

良好的搅拌要求物料之间的相对运动尽可能复杂,因为物料之间的相对位置变化越频繁,物料之间的对流、剪切和扩散作用就越明显。传统的物理实验无法得到骨料在搅拌过程中的准确运动特性,但这一点在 EDEM 中可以实现。

为了分析物料在搅拌过程的相对位置变化情况,在投料结束后,选取两个相邻的颗粒,编号分别为 92251 和 94590,如图 6 所示,分别用绿色和红色标记。通过追踪其在整个搅拌过程的运动轨迹,来分析其运动特性。

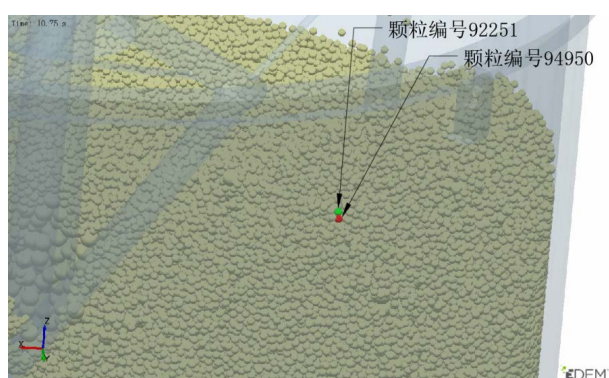


Figure 6. Selection of particles
图 6. 颗粒的选取

颗粒选取完成后,设置其显示方式为流显示,显示步长为所有时间步。在仿真进行 11 s、16 s 和 40 s 时分别记录颗粒的运动轨迹,如图 7 至图 9 所示。

由图 7 可知,仿真时间进行 11 s 时,所标记的两个颗粒之间基本没有相对运动,颗粒的运动轨迹基本重合。这是由于标记的颗粒生成时间较晚,落入搅拌缸的时候处于物料的顶部,而搅拌铲板的位置相对较低,此时基本没有受到搅拌作用。由图 8 可以看出,当仿真进行至 16 s 时,标记的两个颗粒之间逐渐开始产生相对运动,此时两个颗粒在横向和轴向的运动轨迹不在相近,速度的大小和方向差异程度慢慢增大。由图 9 可以看出,仿真 16 s 之后,标记的两个颗粒的整体运动趋势相似,在搅拌铲板的作用下,两者在横向方向都是绕搅拌轴做圆周运动,在轴向方向存在上下的往复运动。但在相同的搅拌时刻,两个颗粒相对位置是在不断变化的。

由图 7 可知,仿真时间进行 11 s 时,所标记的两个颗粒之间基本没有相对运动,颗粒的运动轨迹基本重合。这是由于标记的颗粒生成时间较晚,落入搅拌缸的时候处于物料的顶部,而搅拌铲板的位置相对较低,此时基本没有受到搅拌作用。由图 8 可以看出,当仿真进行至 16 s 时,标记的两个颗粒之间逐渐开始产生相对运动,此时两个颗粒在横向和轴向的运动轨迹不在相近,速度的大小和方向差异程度慢慢增大。由图 9 可以看出,仿真 16 s 之后,标记的两个颗粒的整体运动趋势相似,在搅拌铲板的作用下,两者在横向方向都是绕搅拌轴做圆周运动,在轴向方向存在上下的往复运动。但在相同的搅拌时刻,两个颗粒相对位置是在不断变化的。

4.2. 搅拌均匀度分析

搅拌均匀度是评定搅拌参数好坏的关键指标。对于物理实验来说,测定混凝土各物料之间的混合程度相对困难,一般采用水洗法,即通过对新拌混凝土进行局部采样,然后加水溶解,收集出骨料后进行含量的测定。该方法存在以下两点不足之处,一是局部的混合程度不具有充分的代表意义,如当取样位置位于搅拌低效区时,该处的物料混合均匀度显然要小于整体的混合均匀度;二是取样时,取样仪器在探入混凝土的过程中,会对物料既有的分布造成一定程度的破坏,加大了测量的误差。

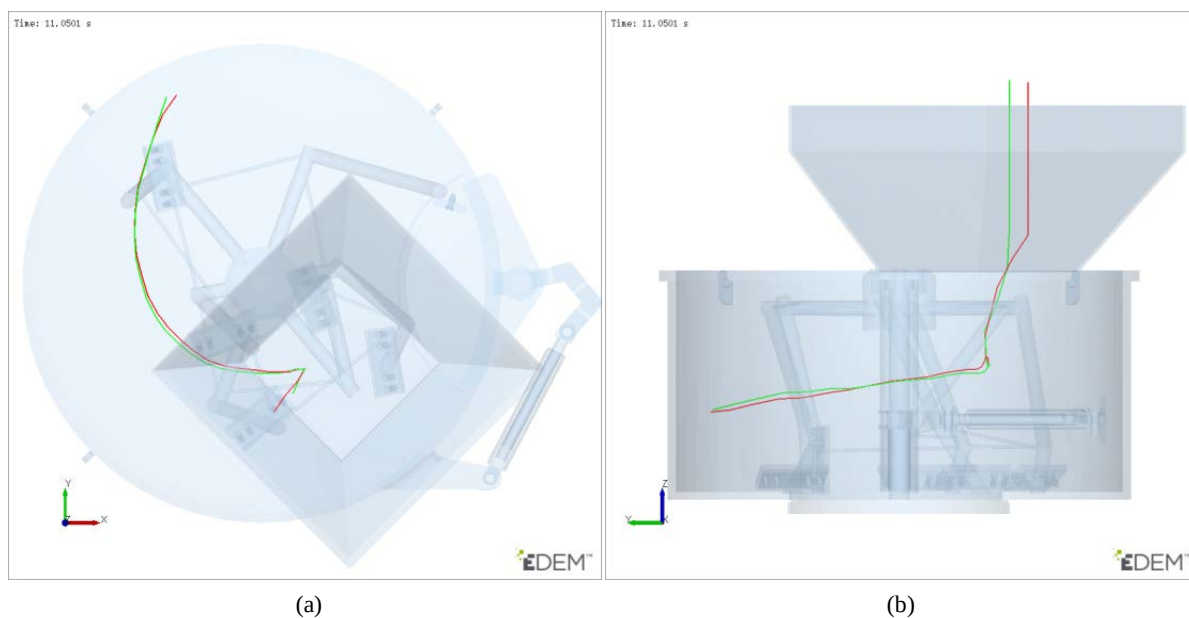


Figure 7. Particle trajectory at 11 s: (a) Top view of movement track at 11 s; (b) Front view of movement track at 11 s

图 7. 11 s 时颗粒运动轨迹: (a) 11 s 时运动轨迹俯视图; (b) 11 s 时运动轨迹正视图

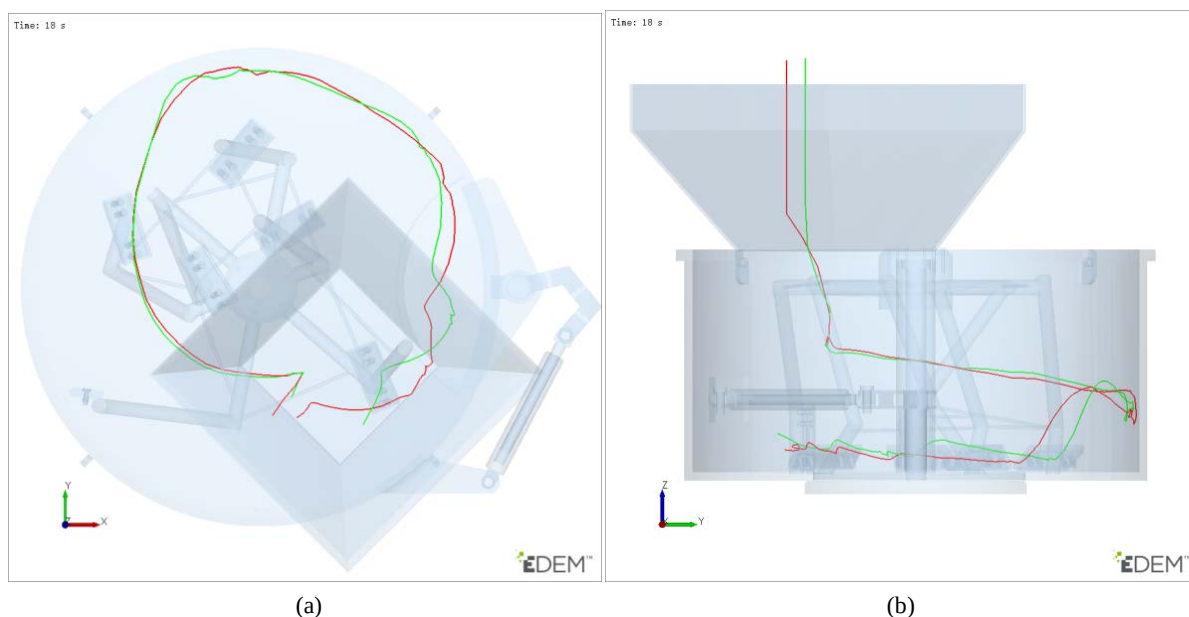


Figure 8. Particle trajectory at 16 s: (a) Top view of movement track at 16 s; (b) Front view of movement track at 16 s

图 8. 16 s 时颗粒运动轨迹: (a) 16 s 时运动轨迹俯视图; (b) 16 s 时运动轨迹正视图

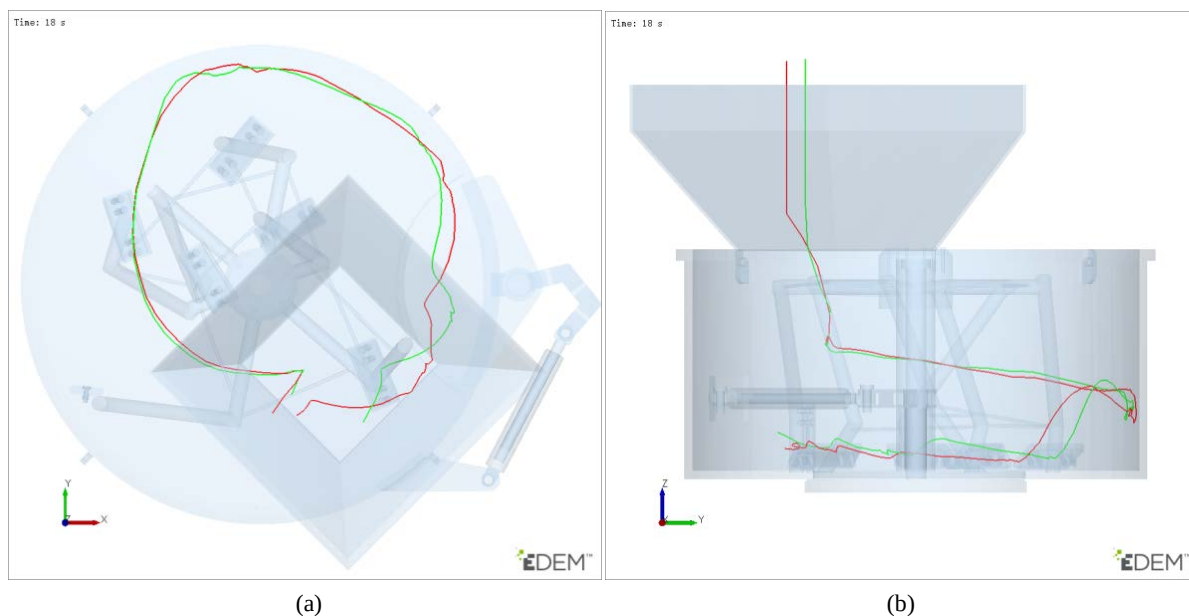


Figure 9. Particle trajectory at 40 s: (a) Top view of movement track at 40 s; (b) Front view of movement track at 40 s
图 9. 40 s 时颗粒运动轨迹: (a) 40 s 时运动轨迹俯视图; (b) 40 s 时运动轨迹正视图

在 EDEM 中, 对结果进行后处理, 用离散系数来反映物料混合的均匀度, 其基本原理与物理试验测量的方法类似, 但可以有效避免上述水洗法的两个明显缺点。离散系数的计算首先是对物料进行网格划分, 如图 10 所示。通过计算每个网格内的物料混合均匀度来综合反映整体的物料混合均匀度。

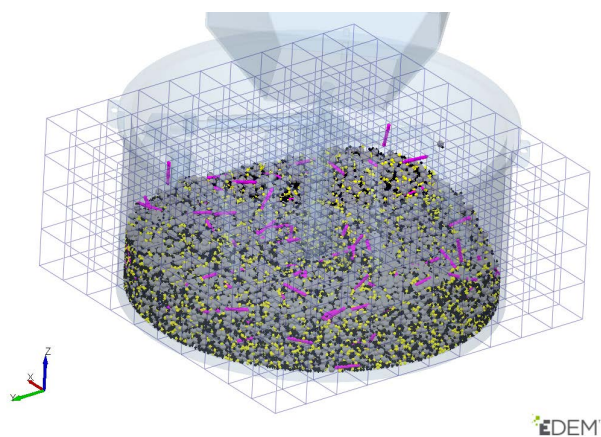


Figure 10. Finite element mesh generation
图 10. 有限元网格划分

网格相当于物理试验的取样区域, 在 EDEM 中, 网格可以涵盖整个仿真区域, 相当于综合考虑了搅拌缸内所有区域的物料混合均匀度, 且不会破坏物料原有的分布情况。网格的划分不宜过大或者过小, 过大的网格划分会导致局部均匀度不具有代表意义, 但网格的尺寸也不应小于单个粗骨料的尺寸。综合考虑, 设置单个网格的尺寸为 $200 \times 200 \times 200$ mm, 共计划分 400 个网格。

在 EDEM 的后处理模块中, 每隔 3 s 分别输出水泥、粉料、细骨料和粗骨料在每个网格内的颗粒个数数据, 将其在 EXCEL 表格中进行数据处理, 计算出离散系数。整理后可以得到物料在搅拌过程中, 混合均匀度随时间变化的关系, 如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 离散系数的相对大小随物料粒径的增大而增大, 在相同大小的网格内包含的粒径小的颗粒个数要多于大粒径颗粒的个数, 因为颗粒数量多的物料均匀度显然更接近理想的混合均匀度。因此网格划分的尺寸应当在满足有效性的基础上越小越好。总体来看, 四种物料在搅拌过程中的离散系数变化趋势相同, 在搅拌初期, 离散系数下降较快, 随后慢慢趋于平稳。即在搅拌前期的较短时间内, 搅拌使得物料均匀度具有显著提升, 达到宏观上的均匀, 此后主要物料在搅拌缸内主要发生剪切和扩散作用, 慢慢达到微观层面的均匀。

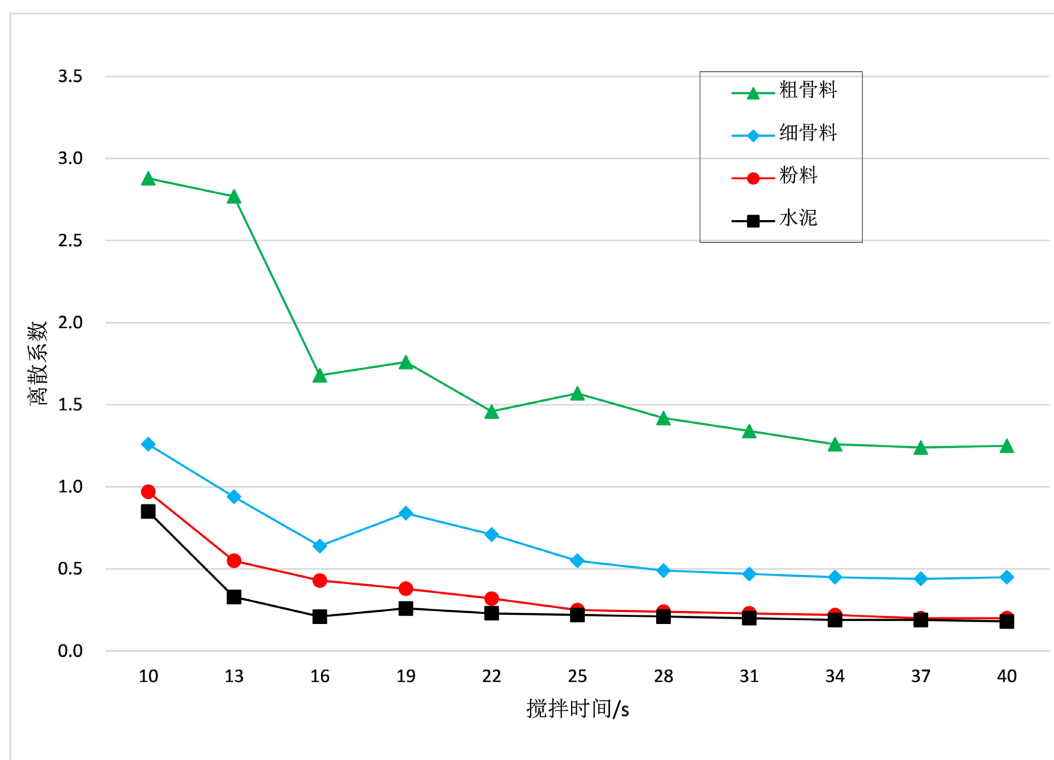


Figure 11. Relationship between material dispersion coefficient and time

图 11. 物料离散系数随时间变化关系

4.3. 正交试验仿真结果分析

所有仿真试验完成后, 可分别得到水泥、粉料、细骨料和粗骨料的离散系数。为了综合考虑不同物料的混合均匀度情况, 将四种物料的离散系数取其均值作为试验的评价指标, 评价指标越小则说明物料的混合效果越好, 将试验结果整理可得表 3。其中, I、II、III 分别表示对应的一、二和三水平的试验结果总和, I/3、II/3、III/3 为其对应的均值, 极差表示试验结果最好与最不好的差别, 其大小反映了该因素对试验结果影响的重要性。

由表 3 中的极差值大小可知, 影响混凝土物料混合均匀性最重要的搅拌参数是搅拌速度, 其次是充盈率, 再其次投料顺序和搅拌铲板安装角。从平均值来看, 对搅拌速度来说, 二水平最好, 搅拌速度应选 35 rpm。对充盈率来说, 同样是二水平最好, 充盈率应选 0.4。对投料顺序来说, 三水平较好, 应选投料顺序 3。对搅拌铲板安装角来说, 三水平最好, 应选搅拌铲板安装角为 45°。因此仅从正交试验结果表的初步分析来看, 较优的搅拌参数组合为铲板安装角 45°、搅拌速度 35 rpm、充盈率 0.4、投料顺序为 3。

Table 3. Orthogonal test results
表 3. 正交试验结果

试验序号	搅拌参数				离散系数				评价指标
	铲板安装角	搅拌速度	充盈率	投料顺序	水泥	粉料	细骨料	粗骨料	
1	35°	30 rpm	0.3	1	0.067	0.104	0.358	1.237	0.442
2	35°	35 rpm	0.4	2	0.046	0.091	0.300	0.907	0.336
3	35°	40 rpm	0.5	3	0.059	0.147	0.203	0.982	0.348
4	40°	30 rpm	0.4	3	0.138	0.384	0.236	0.883	0.410
5	40°	35 rpm	0.5	1	0.043	0.106	0.247	1.067	0.366
6	40°	40 rpm	0.3	2	0.063	0.093	0.301	1.108	0.391
7	45°	30 rpm	0.5	2	0.061	0.153	0.272	1.123	0.402
8	45°	35 rpm	0.3	3	0.059	0.100	0.263	0.977	0.350
9	45°	40 rpm	0.4	1	0.053	0.083	0.281	1.020	0.359
I	1.125	1.254	1.182	1.167					
II	1.167	1.051	1.105	1.129					
III	1.111	1.098	1.115	1.107					
I/3	0.375	0.418	0.394	0.389					
II/3	0.389	0.350	0.368	0.376					
III/3	0.370	0.366	0.372	0.369					
极差	0.019	0.068	0.026	0.020					

5. 结论

论文利用离散元仿真软件 EDEM 模拟混凝土的搅拌过程,详细说明了仿真模型的建立和参数的设置,对物料在搅拌过程中的运动特性以及搅拌均匀度进行了分析;根据正交试验的结果得到以下几点结论:

1) 由于仿真中对颗粒的大小和形状进行了放大和简化处理,因此颗粒之间的接触参数并非真实情况下的接触参数,需要通过参数标定试验多次调整使其接近真实情况。

2) 计算离散系数时,对离散元仿真结果进行后处理时,在保证网格划分有效性的情况下,网格尺寸越小,计算结果越能代表真实的搅拌均匀性。

3) 混凝土物料在搅拌开始初期,均匀度上升的较快,短时间内能达到宏观均匀的效果,此后主要依靠扩散和剪切运动逐渐达到微观均匀。

4) 搅拌机的搅拌参数之间存在交互作用,单独考虑某一搅拌参数的取值是不合理的,在研究的搅拌参数超过两个时,应采用正交试验分析。

参考文献

- [1] 徐德儒. 工业废弃硅粉-粉煤灰模袋混凝土力学性能及抗冻性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [2] Ferraris, C.F. (2001) Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **106**, 391-399. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>
- [3] Sen, M., Karkala, S., Panikar, S., et al. (2017) Analyzing the Mixing Dynamics of an Industrial Batch Bin Blender via Discrete Element Modeling Method. *Processes*, **5**, Article 22. <https://doi.org/10.3390/pr5020022>

-
- [4] Deng, X.M., Yu, L. and Wang, X.G. (2019) Influence of Charging Mixing Order on Concrete Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **504**, Article ID: 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/504/1/012004>
 - [5] Dils, J., De Schutter, G. and Boel, V. (2012) Influence of Mixing Procedure and Mixer type on Fresh and Hardened Properties of Concrete: A Review. *Materials and Structures*, **45**, 1673-1683. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9864-8>
 - [6] Soni, R.K., Mohanty, R., Mohanty, S. and Mishra, B.K. (2016) Numerical Analysis of Mixing of Particles in Drum Mixers Using DEM. *Advanced Powder Technology*, **27**, 531-540. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.01.016>
 - [7] 尹小琴, 赵守明, 谢俊, 吕晓凤. 双卧轴搅拌机叶片安装角的理论分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(19): 141-144.
 - [8] 郭良, 赵悟, 王敬, 沈威威. 基于 EDEM 双立轴振动搅拌机叶片安装角度仿真分析及试验研究[J]. 现代制造技术与装备, 2018(11): 3-6.
 - [9] 廖泽楚, 高伟, 刘磊, 姜胜强, 谭援强. 螺带式混凝土搅拌机混合特性及 DEM 模拟[J]. 过程工程学报, 2019, 19(4): 668-675.
 - [10] 王玄丰, 赵悟, 汤钊, 王敬. 基于 EDEM 的双立轴搅拌机拌缸倾角对比研究[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(6): 10-13.