

混凝土布料机打散棒的能耗分析

张珂,李志刚,于文达,邹德芳

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究混凝土在布料机搅拌过程中打散棒的能耗,分析搅拌棒各处的受力和磨损情况,优化搅拌棒的几何参数,从而降低驱动电机的能耗、节约能源. 方法 采用 CFD 数值模拟方法建立混凝土的 Bingham 理论模型,并基于混凝土 V 型漏斗和 L 型箱流动性实验与数值模拟的实验数据进行对比,得出混凝土理论模型的准确参数;在混凝土布料机的三维几何建模下,数值模拟分析混凝土在布料机打散过程中打散棒的磨损和能耗情况. 结果 通过数值模拟和实验结果对比标定混凝土的屈服应力为 200 Pa,塑性黏度为 350 Pa·s,数值模拟分析得出打散棒在 30 r/min 下的扭矩为 158.52 N·m,驱动电机的功率约为 0.75 kW,且打散棒在转动过程中叶片根部受力最大. 结论 Bingham 模型作为混凝土的理论模型是可行的,通过数值模拟方法能够分析出打散棒在转动过程中叶片根部的磨损情况最为严重,并能够准确计算出打散棒的能耗情况,这对混凝土布料机打散棒驱动电机的选型及工艺参数设定具有指导意义.

关键词 混凝土布料机;打散棒;计算流体力学;能耗分析

中图分类号 TU274.7

文献标志码 A

Energy Consumption Analysis of the Scattering-Rod of Concrete Distributor

ZHANG Ke, LI Zhigang, YU Wenda, ZOU Defang

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The research predicts the energy consumption of the concrete dispersing bar during the mixing process of the distributing machine. It can analyze the stress and wear of the mixing bar and optimize the geometric parameters of the mixing bar, thereby reducing the energy consumption of the drive motor and saving energy. The CFD numerical simulation method was used to establish the Bingham theoretical model of concrete, and based on the comparison of the experimental data of the concrete V-funnel and L-box fluidity experiment and numerical simulation, the accurate

收稿日期:2019-09-26

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0704003);辽宁省自然科学基金项目(20180551119);辽宁省教育厅基金项目(LJZ2017031);辽宁省教育厅科学研究项目(Z2219050);住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-079)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士研究生导师,主要从事现代建筑产业技术装备方面研究.

parameters of the concrete theoretical model were obtained. Under the modeling, the numerical simulation analyzes the wear and energy consumption of the breaking rods of the concrete during the breaking process of the distributor. Through numerical simulation and experimental results comparison, the yield stress of the calibrated concrete is 200 Pa, the plastic viscosity is 350 Pa·s, and the numerical simulation analysis shows that the torque of the breaking bar at 30 r/min is 158.52 N·m, and the power of the driving motor is about 0.75 kW, and the blade root is subjected to the greatest force during the rotation of the breaking rod. The Bingham model is feasible as a theoretical model of concrete. The numerical simulation method can analyze the most serious wear of the blade root during the rotation of the dispersing bar, and can accurately calculate the energy consumption of the dispersing bar. The selection of machine driving motors and the setting of process parameters have a guiding significance.

Key words: concrete distributor; scattering rod; computational fluid dynamics; energy consumption analysis

随着我国建筑业的快速发展,混凝土布料机在装配式建筑业中扮演愈来愈重要的角色^[1].在布料过程中,混凝土布料机打散棒的磨损和能耗情况一直备受研究人员所关注^[2-4].为了对机械内部的搅拌装置进行分析,许多学者和研究人员进行了多次实验并且消耗了大量人力和物力^[5].在这种情况下需要新的分析方法,因数值模拟方法能够节省人力和物力,可以避免重复的实验次数,带来了良好的社会效益,使得更多的研究人员采用数值模拟方法对机械内部的搅拌装置进行分析^[6-8].

B. BLAIS 等^[9]通过固液耦合模型模拟黏性悬浮液在搅拌槽中的流动并计算出颗粒悬浮的最小叶轮速度.肖启瑞^[10]建立了搅拌筒容积的精确计算模型,基于该模型推导了搅拌筒驱动功率的表达式.高耀东等^[11]采用流固耦合方法研究流体载荷对搅拌叶片的影响,应用有限元仿真软件对搅拌叶片进行数值模拟分析,得到搅拌叶片在搅拌与出料过程中所受的应力.黄涛^[12]研究 GJC100-30 型水泥车搅拌器在正常工况下的功率及其影响因素并进行计算分析.T. SHAO 等^[13]使用固液耦合方法数值模拟搅拌槽中固体悬浮液的流动行为,通过仿真分析可以看出颗粒在搅拌槽悬浮液中从微观到宏观的运动机理.J. E. WALLEVIK 等^[14]为了研究混凝土搅拌

混合后的剪切效果,对混凝土搅拌车的剪切速率进行分析.

国内外研究学者对搅拌装置的计算分析方面研究众多,但对于混凝土布料机在搅拌过程中预测打散棒的能耗情况研究较少.基于此,笔者利用 CFD 数值模拟方法对混凝土布料机的打散棒进行能耗分析,建立混凝土的 Bingham 理论模型,通过 V 型漏斗和 L 型箱的流动性实验对混凝土的理论模型进行参数标定;并在三维建模下分析混凝土布料机打散过程中打散棒的磨损和能耗.研究表明:Bingham 模型作为混凝土的理论模型是可行的,通过数值模拟方法能够分析出打散棒在转动过程中叶片根部的磨损情况最为严重,并能够准确计算出打散棒的能耗情况.

1 数值计算基本理论

1.1 混凝土的理论模型

Bingham 模型是一种非牛顿流体,模型中的流变参数包括屈服应力和塑性黏度,屈服应力决定流体的扩散度和形态,而塑性黏度与流体的流动速度有关.

Bingham 理论模型的本构方程表达式如下^[6]:

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}, \tau \geq \tau_0. \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_0. \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力; τ_0 为屈服应力; μ_0 为塑

性黏度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

剪切速率的值随着速度和时间的变化而变化,其计算公式如下:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \sqrt{2S:S}, \\ S = \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T]. \end{cases} \quad (3)$$

由于 $\tau = \tau_0$ 时可能会带来计算困难,故用动力黏度方程来表征 Bingham 模型本构方程^[6]. 计算公式如下:

$$\mu = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}(1 - e^{-m_p \dot{\gamma}}). \quad (4)$$

式中: m_p 为恢复增长系数,它的数值越大就越接近式(1)的本构方程。

1.2 功率关系式

打散棒在转动过程中,混凝土与打散棒之间存在摩擦力和黏结力^[15-16]. 故主要考虑摩擦力和黏结力对打散棒的影响。

打散棒与混凝土摩擦力产生单位面积扭矩和功率的计算公式为

$$T_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot p \cdot f. \quad (5)$$

$$P_1 = \omega \cdot T_1. \quad (6)$$

式中: x 和 y 分别为 x 轴和 y 轴坐标; p 为混凝土的压强; f 为摩擦系数,取0.6; ω 为角速度。

打散棒与混凝土黏结力单位面积产生扭矩和功率的计算公式为

$$T_2 = x \cdot F_y - y \cdot F_x. \quad (7)$$

$$P_2 = \omega \cdot T_2. \quad (8)$$

式中: F_x 和 F_y 分别为 x 和 y 方向的黏结力。

上述计算只是对于打散棒上某个点的扭矩和功率进行计算. 故打散棒所有面产生扭矩和功率的计算公式分别为

$$M = \int_A (T_1 + T_2) dA. \quad (9)$$

$$P = \int_A (P_1 + P_2) dA. \quad (10)$$

打散电机的效率约为 $\eta = 67\%$,故电机驱动打散棒的功率公式为

$$P_{\text{电}} = \frac{P}{\eta}. \quad (11)$$

1.3 物理场的基本方程

数值模拟计算混凝土理论模型时,为了使得仿真模型更准确,在分析时需要对数值分析提出以下几方面假设:

(1)混凝土作为单相非牛顿流体,不可压缩流动,所有几何模型内的混凝土视为满载;

(2)由于混凝土的雷诺数相对来说较小,则流体的流动为层流;

(3)流体的流动是稳定的,物理场为等温场,流体和壁面之间有相对滑移,滑移长度为0.4 mm^[3].

通过以上的假设,便于对物理场进行建模,简化了许多复杂的因素,为后续边界条件的设置和仿真计算提供了便捷。

在CFD仿真分析的过程中,物理场的基本方程包括连续性方程和动量方程,本文功率计算采用的是瞬态分析,条件满足维纳-斯托克斯方程,则分析流体的基本方程如下:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot (-pI + K) + F +$$

$$\rho g. \quad (12)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0. \quad (13)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T). \quad (14)$$

式中: p 、 u 分别为流体的压力和速度; ρ 、 μ 分别为流体的密度和动力黏度; F 为外力。

1.4 模型设置

采用二维几何模型绘制标准V型漏斗和L型箱,二维绘制的目的是为了缩短计算时间,但并不影响计算的效果. 布料机壳体和打散棒则采用三维的几何模型,布料机的体积为0.5 m³,打散棒和布料机壳体的几何模型如图1所示。

在笔者研究模型中,V型漏斗和L型箱都需要定义入口和出口,入口是为了能够使混凝土和空气进入到箱体内,出口是使得混凝土和空气流出. 大气压力设置为标准大气压,对填充好的流体域设置重力,V型漏斗和L型箱的内部壁和流体接触滑移长度为

0.4 mm^[3]. 在最初的时刻, V 型漏斗和 L 型箱中填满混凝土, 即 $t = 0$.

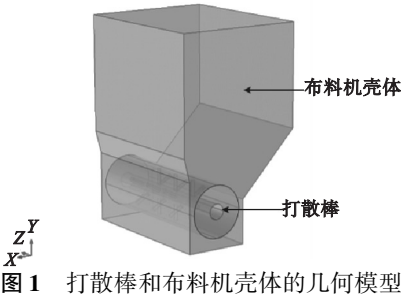


图 1 打散棒和布料机壳体的几何模型

Fig. 1 Geometric model of the scattering rod and the distributor housing

在布料机的设置中, 混凝土的重力加载在几何模型内, 方向为 Y 轴的负方向, 布料机中流体和壁面接触的摩擦系数为 0.6, 流体的密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 打散棒的转速设定为 30 r/min , 旋转轴中心的坐标为 $(0, 0, \infty)$. 最后进行网格划分, 选用的求解器为瞬态求解器和分离式求解器, 能够更加精确地

对模型进行分析计算, 达到最佳的效果.

2 混凝土模型参数标定

测量混凝土的性能实验有 V 型漏斗、L 型箱、U 型箱、J 型环以及塌落度实验等. 在本研究中, 通过新鲜测试中的 V 型漏斗和 L 型箱实验对混凝土进行测量. 混凝土 V 型漏斗和 L 型箱的流动性实验中, 对于 V 型漏斗, 排空流体的时间是衡量混凝土参数的指标, L 型箱则是记录混凝土从流动到停止的时间. 实验的目的有以下两个方面, 一是适用于测定混凝土的黏稠度和抗离析的程度, 二是能够对混凝土理论模型的参数进行标定^[17-20]. 混凝土 V 型漏斗的数值模拟和实验过程如图 2 和图 3 所示, L 型箱的数值模拟和实验过程如图 4 和图 5 所示.

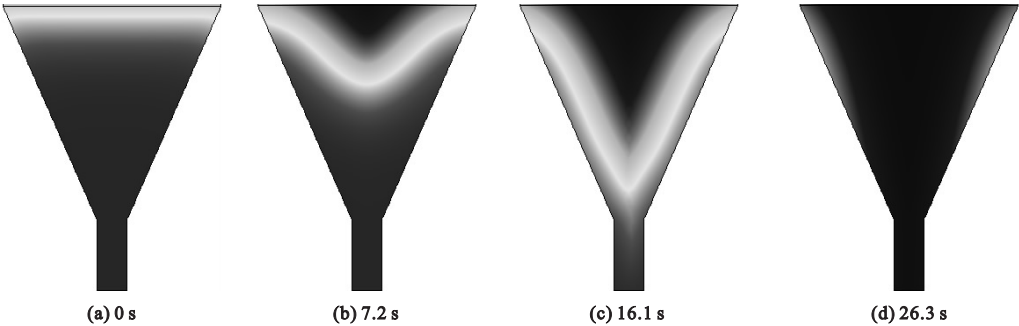


图 2 V 型漏斗数值模拟

Fig. 2 The numerical simulation of V-funnel

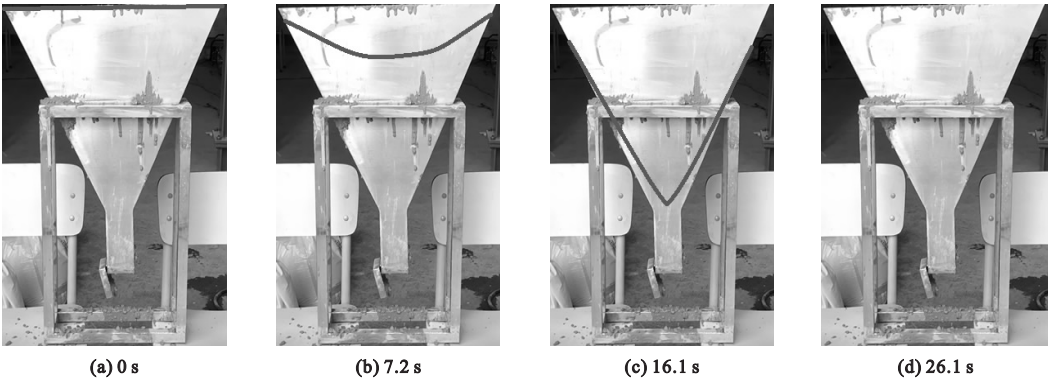


图 3 V 型漏斗实验过程

Fig. 3 The experimental process of V-funnel

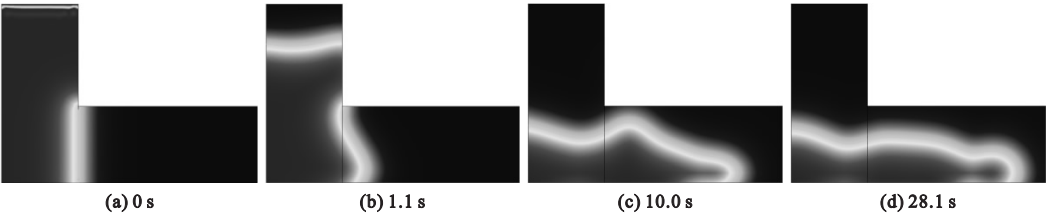


图4 L型箱数值模拟

Fig. 4 The numerical simulation of L-box

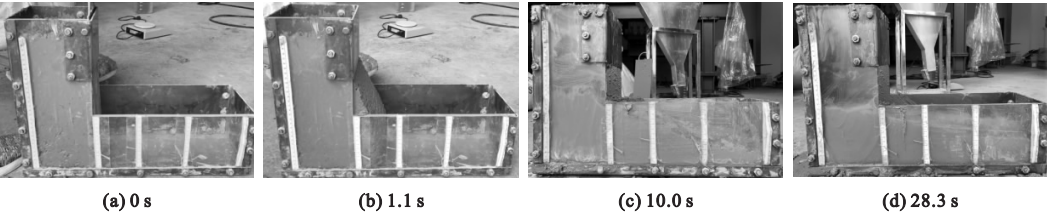


图5 L型箱实验过程

Fig. 5 The experimental process of L-box

通过实验室和三组数值模拟计算得出的结果进行对比,对比结果见表1.可见,屈服应力和塑性黏度的取值对实验结果影响很大.V型漏斗和L型箱的模拟对此结果如图6、图7所示.

表1 数值模拟和实验结果

样本	V型漏斗通过时间/s	L型箱流动静止时间/s	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)
模拟样本1	26.3	28.1	200	350
模拟样本2	21.8	22.1	200	300
模拟样本3	22.5	19.5	100	350
实验样本	26.1	28.3	—	—

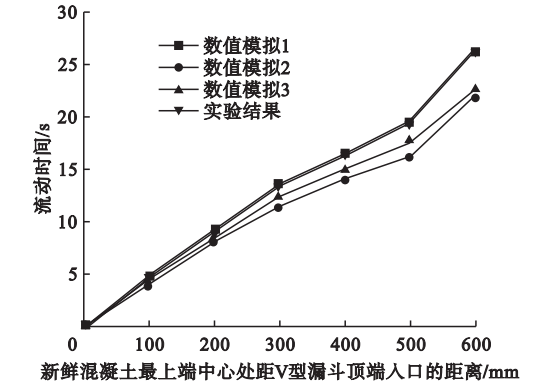


图6 V型漏斗结果对比

Fig. 6 The comparison results of V-funnel

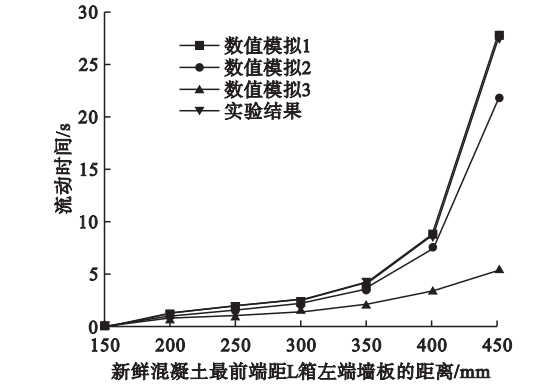


图7 L型箱结果对比

Fig. 7 The comparison results of L-box

从图6和图7中可以看出,模拟样本1与实验的结果对比误差最小,能够更准确的表征混凝土的理论模型.

3 实验仿真分析

采用标定的混凝土理论模型和计算的基本理论分析混凝土布料机打散棒在转动过程中的磨损及能耗情况,能够对打散棒的工艺参数设定和电机选型进行预测.

混凝土布料机打散棒在 30 r/min 的转动下,可计算出由摩擦力和黏结力产生的扭矩,仿真云图如图8和图9所示.从仿真云图中可以看出,混凝土布料机打散棒在转动过程中叶片根部的受力和扭矩最大.可表明,当打散棒使用时间过久,会造成打散棒叶片根部磨损严重,最终搅拌失效.

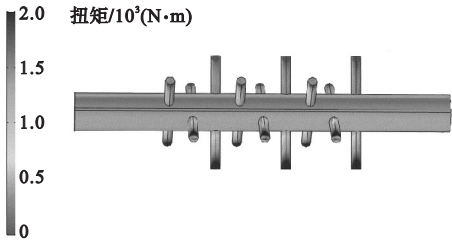


图8 摩擦力产生单位面积上的扭矩

Fig. 8 Torque per unit area generated by friction

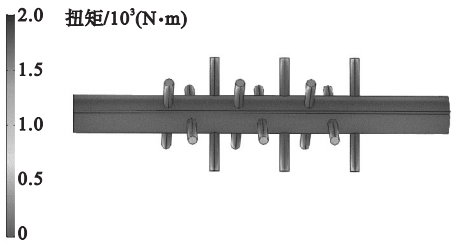


图9 黏结力产生单位面积上的扭矩

Fig. 9 Torque per unit area generated by cohesive force

通过计算能够分析出打散棒在搅拌过程中产生的扭矩值和驱动电机功率值,单位面积上功率的仿真云图见图10和图11所示.

通过仿真分析计算,打散棒转速在 30 r/min 的情况下,打散棒和混凝土之间产生的扭矩约为 158.52 N·m,所需驱动电机的功率约为 0.75 kW.从结果中可以看出,混凝土

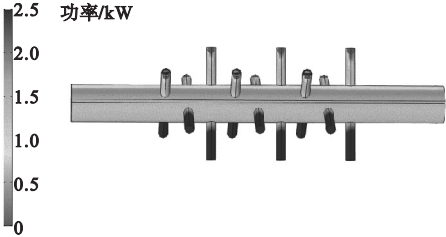


图10 摩擦力产生单位面积上的功率

Fig. 10 Power per unit area generated by friction

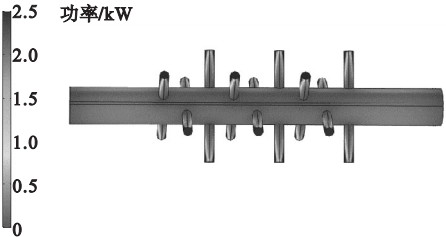


图11 黏结力产生单位面积上的功率

Fig. 11 Power per unit area generated by cohesive force
土布料机打散棒产生能耗主要的区域是叶片根部,为了降低产生的能耗应合理设计打散棒叶片.

4 结 论

(1)通过混凝土新鲜属性测试和数值模拟实验结果对比得出,Bingham 模型表征混凝土是可行的.

(2)当混凝土布料机打散棒转速为 30 r/min时,采用 CFD 方法数值模拟分析得出打散叶片根部受力最大,故磨损情况最为严重.同时,计算得出打散棒和混凝土之间产生的扭矩约为 158.54 N·m,所需驱动电机的功率约为 0.75 kW.

(3)该方法适用于流体机械搅拌器的分析计算,能够对搅拌器的磨损及能耗情况进行预测,为后续的工艺参数设定和电机选型提供指导.

参考文献

[1] 邹德芳,周鹏,孙健,等.大型智能PC外墙板混合生产线工艺及成套设备[J].混凝土与水泥制品,2017(4):37-41.
(ZOU Defang,ZHOU Peng,SUN Jian,et al. Large-scale intelligent PC exterior wall board

- mixing production line process and complete sets of equipment [J]. Concrete and cement products, 2017(4):37-41.)
- [2] 邹德芳, 闻诗洋, 于文达, 等. 多螺杆混凝土布料机螺旋下料装置驱动功率计算[J]. 建筑机械化, 2019(7):17-20.
(ZOU Defang, WEN Shiyang, YU Wenda, et al. Driving power calculation method for screw cutting device of multi-screw concrete distributing machine [J]. Construction mechanization, 2019(7):17-20.)
- [3] KARAKURT C, ÇELİK A O, YILMAZER C, et al. CFD simulations of self-compacting concrete with discrete phase modeling [J]. Construction and building materials, 2018(186):20-30.
- [4] LASHKARBOLOUK H, HALABIAN A M, CHAMANI M R. Simulation of concrete flow in V-funnel test and the proper range of viscosity and yield stress for SCC [J]. Materials and structures, 2014, 47(10):1729-1743.
- [5] GRAM A, SILFWERBRAND J, LAGERBLAD B. Obtaining rheological parameters from flow test analytical, computational and lab test approach [J]. Cement and concrete research, 2014(63):29-34.
- [6] 崔激, 宋慧芳. 自密实混凝土流动性及浇筑过程的CFD数值模拟[J]. 混凝土, 2017(8):111-115.
(CUI Wei, SONG Huifang. CFD simulation of fresh self-compacting concrete flow and casting process [J]. Concrete, 2017(8):111-115.)
- [7] TICHKO S, MAELE J V, VANMASSENHOVE N. Numerical simulation of formwork pressure while pumping self-compacting concrete bottom-up [J]. Engineering structures, 2014(70):218-233.
- [8] 邹晨, 谢明辉, 周国忠, 等. 穿流式搅拌器槽内流场的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2012(4):239-241.
(ZOU Chen, XIE Minghui, ZHOU Guozhong, et al. Numerical simulation for flow field in stirred tank of punched impeller [J]. Machinery design & manufacture, 2012(4):239-241.)
- [9] BLAIS B, LASSAIGNE M, GONIVA C, et al. Development of an unresolved CFD-DEM model for the flow of viscous suspensions and its application to solid-liquid [J]. Journal of computational physics, 2016(318):201-221.
- [10] 肖启瑞. 混凝土车辆搅拌筒装载量与驱动功率的精确计算[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(3):40-45.
(XIAO Qirui. Precise calculation on loadage and drive power of irregular concrete mixing drum [J]. Tractor & farm transporter, 2014, 41(3):40-45.)
- [11] 高耀东, 胡鑫. 基于Workbench混凝土搅拌车叶片应力分析[J]. 机械强度, 2016, 38(4):887-891.
(GAO Yaodong, HU Xin. Based on the workbench concrete truck mixer blade stress analysis [J]. Journal of mechanical strength, 2016, 38(4):887-891.)
- [12] 黄涛. 水泥车搅拌功率计算及影响因素[J]. 西部探矿工程, 2017(9):19-23.
(HUANG Tao. Calculation of mixing power of cement truck and its influencing factors [J]. West-China exploration engineering, 2017(9):19-23.)
- [13] SHAO T, HU Y Y, WANG W T, et al. Simulation of solid suspension in a stirred tank using CFD-DEM coupled approach [J]. Fluid dynamics and transport phenomena, 2013, 21(10):1069-1081.
- [14] WALLEVIKA J E, WALLEVIK B O H. Analysis of shear rate inside a concrete truck mixer [J]. Cement and concrete research, 2017(95):9-17.
- [15] 聂超超, 韩振南, 赵远, 等. 基于EDEM数值模拟的搅拌叶片优化设计[J]. 机械设计与制造, 2019(4):17-25.
(NIE Chaochao, HAN Zhennan, ZHAO Yuan, et al. Optimal design of mixing blade based on EDEM numerical simulation [J]. Machinery design & manufacture, 2019(4):17-25.)
- [16] 詹军民, 俞经虎, 代欣. 基于Fluent的搅拌桨数值仿真及结构优化[J]. 食品与机械, 2017(33):75-79.
(ZHAN Minmin, YU Jinghu, DAI Xin. Numerical simulation of agitating value and structure optimization based on Fluent [J]. Food & machinery, 2017(33):75-79.)
- [17] 李斌, 王凯威, 柯安娜. 混凝土搅拌车螺旋叶片参数化设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2):335-343.
(LI Bin, WANG Kaiwei, KE Anna. The parametric design method for helical blades of concrete mixer truck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2):335-343.)
- [18] 张璇, 李之达, 张志华. 基于离散元的新拌混凝土流变性能分析[J]. 武汉理工大学学报, 2017(39):62-67.
(ZHANG Xuan, LI Zhida, ZHANG Zhihua. Rheological properties analysis of fresh concrete based on discrete element method (DEM) [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2017(39):62-67.)
- [19] 李健, 张宝, 徐敏, 等. 软轴摩擦力计算公式的结构参数优化设计[J]. 广西科技大学学报, 2016, 27(3):21-25.
(LI Jian, ZHANG Bao, XU Min, et al. The structure parameter optimization design of soft shaft friction empirical formula [J]. Journal of Guangxi university of science and technology, 2016, 27(3):21-25.)
- [20] 李健, 张宝, 徐敏, 等. 基于LS和PSO的钢丝软轴摩擦力计算公式推导[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(2):171-174.
(LI Jian, ZHANG Bao, XU Min, et al. Research of soft shaft friction empirical formula to drive based on LS and PSO [J]. Machine design and research, 2016, 32(2):171-174.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)