

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.03.007

基于 DEM 的多孔粒状铵油炸药现场混装车螺旋的输送稳定性研究*

安振伟 李宏兵 张小勇 陈世雄

中国葛洲坝集团易普力股份有限公司(重庆,401121)

[摘要] 为提高多孔粒状铵油炸药现场混装车的计量精度,采用离散元法(DEM),以定量底螺旋的输送质量流量稳定性变异系数 C_v 、螺旋单圈输送量 Q_0 以及螺旋轴扭矩 M 为评价指标,对定量底螺旋的输送稳定性进行研究。结果表明,多孔粒状铵油炸药混装车采用变距底螺旋输送多孔粒状硝酸铵时,螺旋输送质量流量更稳定,输送质量流量的 C_v 最低可达到5.51%;在统计范围内,变距底螺旋的 Q_0 范围为3.12~3.19 kg, C_v 仅为1.00%,相较于等距底螺旋受螺旋转速的影响较小;在相同转速条件下,变距底螺旋轴的平均扭矩比等距底螺旋要低,且在统计范围内 C_v 为4.29%,较等距底螺旋更稳定、更节能。对比的实际标定单圈输送量与仿真结果表明,该仿真方法可靠。

[关键词] 混装车;输送稳定;离散元法(DEM);粒状铵油;定量底螺旋

[分类号] TQ560; TD235

Stability of Screw Conveying of On-Site Mixed Vehicles of ANFO Based on DEM

AN Zhenwei, LI Hongbing, ZHANG Xiaoyong, CHEN Shixiong

China Gezhouba Group Explosive Co., Ltd. (Chongqing, 401121)

[ABSTRACT] In order to improve the measurement accuracy of on-site mixed vehicle of ANFO, the discrete element method was used to study the conveying stability of the quantitative bottom screw conveyor, using the coefficient of variation (C_v) of the mass flow rate stability of the quantitative bottom screw, the single-turn conveying volume of the screw conveyor, and the screw conveyor shaft torque as evaluation indicators. The results show that the mixed vehicles of ANFO using variable-pitch bottom screw conveyor to convey porous granular ammonium nitrate have a more stable mass flow rate, and the lowest C_v of the mass flow rate stability reaches 5.51%. Within the statistical range, the single-turn conveying volume of the variable pitch screw conveyor ranges from 3.12 to 3.19 kg, with a C_v of only 1.00%, showing less influence from the screw conveyor rotation speed compared to a constant pitch screw conveyor. Under the same rotation speed conditions, the average torque of the variable pitch screw conveyor shaft is lower than that of the constant pitch screw conveyor, with a C_v of 4.29%, demonstrating greater stability and energy conservation. The comparison between the actual calibrated single-turn conveying volume and the simulation results shows that this simulation method is reliable.

[KEYWORDS] mixed loading vehicle; conveying stability; discrete element method (DEM); granular ammonium oil; quantitative bottom screw

0 引言

多孔粒状铵油炸药现场混装车(以下简称混装车)主要由汽车底盘、多孔粒状硝酸铵料仓、柴油料仓、螺旋输送系统、控制系统组成。作为一种新型的铵油炸药混拌及装填设备,被广泛应用于大中型露

天矿山无水炮孔的装药爆破^[1]。当前,混装车普遍存在输送计量不准确的缺点。影响混装车输送计量精度的因素有很多,包括物料的物理化学性质、螺旋输送机构的结构参数、螺旋转速、控制系统的稳定性、填充率等^[2]。混装车所采用的原材料为多孔粒状硝酸铵和柴油。其中,柴油可通过高精度流量计进行精准计量;而多孔粒状硝酸铵主要采用定量底

* 收稿日期:2025-01-22

第一作者:安振伟(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事民爆装备的研制。E-mail: jljerry@163.com

通信作者:陈世雄(1989—),男,博士,高级工程师,主要从事民爆器材及军民融合技术的研究。E-mail: shixiong_chen@126.com

螺旋进行标定计量,定量底螺旋的计量精度直接影响了混装车的计量精度。

为提高计量精度,田惺哲等^[3]提出了一种基于倾角监测的计量补偿修正方法;孙伟博等^[4]采用测速齿轮提高计量脉冲,建立料位高度补偿修正函数,改进计量控制程序。这些理论都是通过优化控制的方式来实现精度的提高。张春明等^[5]增加了计量螺旋的长度,提高了计量精度;于魏清^[6]提出将主轴转速和液压油温度控制在设定的范围内等解决路径,从定性的角度分析了提高计量精度的方法。但对计量精度有直接影响的定量底螺旋自身的输送稳定性缺少相关研究。定量底螺旋的输送稳定性,不仅影响混装车的计量精度,还会影响多孔粒状硝酸铵与柴油的配比精度,进而影响铵油炸药性能。提高定量底螺旋的输送稳定性对提升整车性能具有重要意义。

随着计算机技术的发展,采用离散元软件对螺旋输送机进行仿真分析已成为研究螺旋输送的重要手段。本文中,对混装车定量底螺旋进行设计并建模,采用离散元仿真软件,分析螺旋结构及螺旋转速对螺旋输送稳定性的影响,为提高螺旋的输送计量精度与稳定性提供理论基础。

1 定量底螺旋的结构设计

定量底螺旋主要由螺旋本体、料槽、轴承、联轴器、马达组成。螺旋本体在马达的驱动下,将料槽内的多孔粒状硝酸铵输送到垂直螺旋或者斜螺旋。参数设计如下:

$$Q = \frac{15(D^2 - d^2)cS\rho\varphi n}{2} \quad (1)$$

式中: Q 为输送效率; D 为螺旋外径; d 为螺旋轴外径; c 为输送修正系数,水平螺旋时取1; S 为螺距; ρ 为物料密度; φ 为填充系数; n 为螺旋转速。

根据现场作业的需求,通过查询螺旋输送机相关设计^[7],计算出等距螺旋的相关参数,并进行建模。传统等距螺旋在进料端易存在死区现象,导致进料部分出现堵塞,对螺旋输送性能影响较大。为减少死区现象,让仓体内各个隔仓的物料料位尽量能够同步下降,进而保证进料均匀性。对于进料端采用变距结构,并在变距的最后一段选用等距螺旋或变距螺旋的参数设计,形成变距螺旋、等距螺旋2种结构形式的定量底螺旋输送机^[8]。

因定量底螺旋的结构比较复杂,若不进行简化,仿真模拟分析会变得复杂而且缓慢,以至于一般的

计算机无法完成计算。因此,简化定量底螺旋,省略马达、轴承以及多孔粒状硝酸铵料仓隔板等不必要的结构,保留底螺旋本体的同时,缩短螺旋的长度,多孔粒状硝酸铵料仓只保留V型料槽、角蓬及出料端等,且只考虑对输送有直接作用的中间段。三维模型简图如图1所示。在模拟分析过程中,直接给螺旋轴添加转速和运动模型,使得计算速度加快,模拟结果清楚而有针对性。

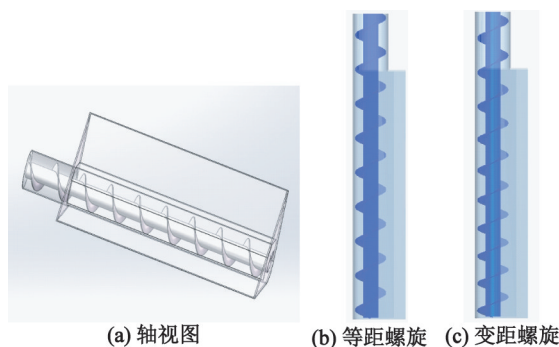


图1 定量底螺旋的三维模型简图

Fig. 1 3D model of the quantitative bottom screw

2 仿真模拟参数设置

2.1 离散元法介绍

离散元法(distinct element method, DEM)是基于分子动力学原理的一种颗粒离散体物料分析方法^[9]。基本思想是把物料简化成具有真实物料特性的颗粒体集合,然后再赋予颗粒间以及颗粒与边界之间某种接触力学模型,当接触发生时接触点处会产生接触力和力矩。通过DEM进行离散体物料的模拟分析,可以直接获得大量复杂且实验很难测得的信息;因此,DEM在分析处理离散体物料时具有很大的优越性^[10]。

2.2 仿真参数设置

采用某公司生产的多孔粒状硝酸铵进行仿真。多孔粒状硝酸铵粒径为2.5 mm,粒径呈正态分布。在离散元仿真软件中,采用球体作为颗粒仿真模型,如图2所示。采用汞侵入法测得适用的孔隙率范围为20%~35%,多孔粒状硝酸铵的孔隙率取30%。在设定多孔粒状硝酸铵密度时宜按实际密度的70%计算;多孔粒状硝酸铵的其他相关物理性质与尿素颗粒等类似^[11]。设定多孔粒状硝酸铵与多孔粒状硝酸铵、多孔粒状硝酸铵与螺旋之间为赫兹-明德林(Hertz-Mindlin)模型,切向无滑动,模型仿真参数设置见表1和表2。

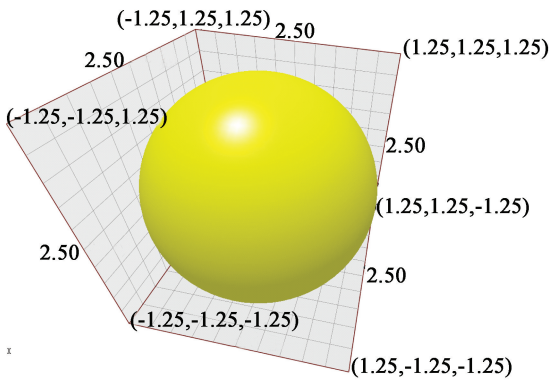


图 2 多孔粒状硝酸铵仿真模型(单位: mm)

Fig. 2 Simulation model of porous granular ammonium nitrate (Unit: mm)

表 1 物理特性参数

Tab. 1 Physical characteristic parameters

项目	泊松比	剪切模量/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
多孔粒状硝酸铵颗粒	0.3	10	1.200×10^3
定量底螺旋(SUS304)	0.3	8×10^4	7.800×10^3

表 2 Hertz-Mindlin 模型参数

Tab. 2 Parameters of Hertz-Mindlin Model

项目	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
多孔粒状硝酸铵颗粒- 多孔粒状硝酸铵颗粒	0.25	0.70	0.30
多孔粒状硝酸铵颗粒- 定量底螺旋(SUS304)	0.03	0.35	0.15

在底螺旋输送机顶部设置一个虚拟平面,并添加颗粒工厂。颗粒工厂采用动态形式,共产生 200 kg 多孔粒状硝酸铵,生成效率为 50 kg/min,仿真时长设置为 15 s,固定时间步长设置为 20%,采样间隔 0.1 s,网格的大小设置为 $3 R_{\min}$ (R_{\min} 是最小填充球体半径),颗粒初始下落速度 2 m/s。

3 仿真模拟与分析

评价混装车底螺旋输送稳定性的重要指标包括螺旋输送质量流量稳定性变异系数 C_v ^[12]、螺旋单圈输送量 Q_0 以及螺旋轴输送扭矩 M 等。通过分析两种螺旋结构在不同转速 n 时的输送稳定性系数,计算螺旋单圈输送量,比较输送扭矩,分析螺旋结构与螺旋转速对底螺旋输送稳定性的影响。

3.1 输送质量流量稳定性变异系数

输送质量流量稳定性变异系数 C_v 是衡量相对离散程度的量。 C_v 越小,表示螺旋输送过程越稳定。 C_v 可通过式(2)~式(4)进行计算。

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N}; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_i - q)^2}{N}}; \quad (3)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{q} \times 100\%。 \quad (4)$$

式中: q 为平均质量流量; q_i 为 i 时刻下的质量流量; N 为实验数据的个数; σ 为标准差。

根据混装车现场实际应用情况,设定底螺旋的转速为 6.28、8.38、10.47 rad/s 和 12.56 rad/s,进行仿真分析。在后处理模块中,在螺旋临近出口位置设置质量流量传感器,统计通过该网格的多孔粒状硝酸铵瞬时质量流量。质量流量传感器的位置及不同工况下质量流量曲线分别如图 3、图 4 所示。图 4 中曲线 1#~8#对应的工况见表 3。

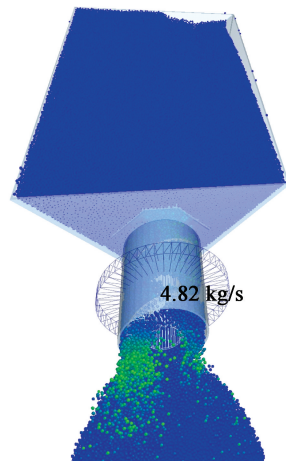


图 3 质量流量传感器的位置

Fig. 3 Position of mass flow sensor

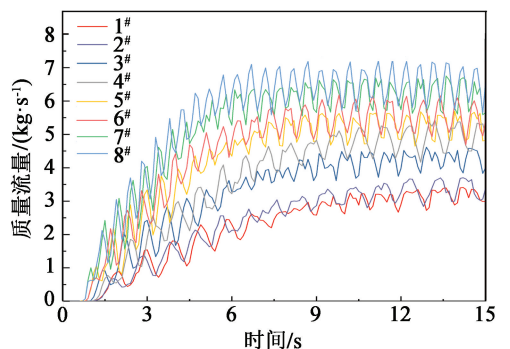


图 4 质量流量统计

Fig. 4 Statistics of mass flow rate

表3 螺旋输送稳定性变异系数

Tab.3 Stability variation coefficient for screw conveyor

工况	$n/$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	螺距 类型	$q/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\sigma/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$C_v/$ %
1 [#]	6.28	变距	3.12	0.205	6.56
2 [#]	6.28	等距	3.33	0.247	7.41
3 [#]	8.38	变距	4.25	0.234	5.51
4 [#]	8.38	等距	4.90	0.366	7.46
5 [#]	10.47	变距	5.29	0.341	6.44
6 [#]	10.47	等距	5.59	0.414	7.40
7 [#]	12.56	变距	6.21	0.418	6.74
8 [#]	12.56	等距	6.53	0.495	7.57

根据图4结果,约10.0 s后全部工况下的质量流量趋于稳定。即在质量流量传感器的设置区域,在当前条件下,颗粒填充螺旋管已达到限值并趋于稳定;同时,高转速情况下稳定时的质量流量要高于低转速情况。

取出料稳定的11~14 s仿真结果,计算不同转速条件下变距螺旋与等距螺旋的输送稳定性变异系数,计算结果见表3。

由表3可知,在相同转速条件下,变距螺旋比等距螺旋的平均质量流量要少。转速为6.28、8.38、10.47 rad/s和12.56 rad/s时,减幅分别为6.30%、13.26%、5.45%、4.90%。分析原因,主要是变距螺旋的输入端螺距较小,向螺旋出口输出的颗粒较少,造成螺旋内颗粒填充系数不足,最终导致平均质量流量偏小。不论是等距螺旋还是变距螺旋,在统计范围内, C_v 都低于10.00%,均满足稳定输送的要求。但在相同转速条件下,变距螺旋的 C_v 要比等距螺旋的 C_v 小。降幅分别为11.47%、13.61%、12.97%、10.96%,表明混装车采用变距螺旋输送多孔粒状硝酸铵时,螺旋输出的质量流量更稳定。对比上述数据发现,底螺旋在变距、转速8.38 rad/s条件下的 C_v 为5.51%,稳定性最好。

3.2 螺旋单圈输送量稳定性

底螺旋单圈输送量 Q_0 是否稳定是衡量螺旋输送稳定性的另一重要指标。单圈输送量

$$Q_0 = 2\pi \frac{q}{n}. \quad (5)$$

式中: q 为平均质量流量; n 为转速。

q 可通过设置质量流量传感器取平均值的方式获取,但受取样点选择限制,存在一定误差;还可测量在某个连续时间段内通过某一区域的多孔粒状硝酸铵的质量,形成点图,并采用Origin软件进行拟合,通过计算该拟合直线的斜率来获取 q 。此时, q

等于拟合直线的斜率 k ,且此方式精度相对较高。

在质量流量传感器同样的位置设置网格分箱分组(grid bin group)模块。以转速为10.47 rad/s为例,取系统稳定的11~14 s仿真结果并拟合,计算 q ,如图5所示。全部统计结果见表4。

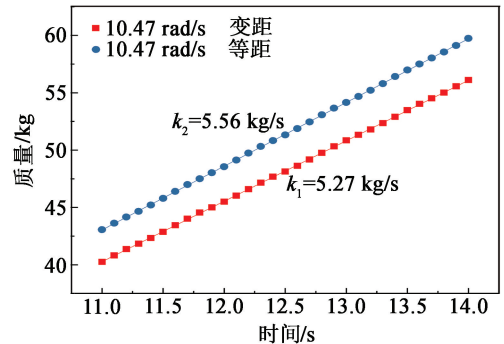


图5 平均质量流量

Fig.5 Average mass flow rate

表4 螺旋单圈输送量

Tab.4 Single-turn conveyance volume

工况	$n/$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	螺距 类型	$q/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_0/$ kg
1 [#]	6.28	变距	3.15	3.15
2 [#]	6.28	等距	3.34	3.34
3 [#]	8.38	变距	4.25	3.19
4 [#]	8.38	等距	4.90	3.67
5 [#]	10.47	变距	5.27	3.17
6 [#]	10.47	等距	5.56	3.34
7 [#]	12.56	变距	6.24	3.12
8 [#]	12.56	等距	6.51	3.26

由表4得知,在相同转速条件下,变距螺旋的单圈输送量较等距螺旋要小。转速为6.28、8.38、10.47 rad/s和12.56 rad/s时,分别降低了5.69%、13.08%、5.09%、4.29%。经计算,变距螺旋单圈的平均输送量为3.16 kg,对应的稳定性变异系数为1.00%。说明其单圈输送量受螺旋转速的影响较小,从另一方面也印证了变距螺旋的稳定性要高于等距螺旋。

由图6得知,在统计范围内,随螺旋转速的提高,变距及等距螺旋的单圈输送量都呈现先增大、后减小的特点。其中,在转速8.38 rad/s时单圈输送量最大,表明在该转速条件下,螺旋叶片作用在多孔粒状硝酸铵上的合力最大,多孔粒状硝酸铵颗粒在螺旋内回流或抛洒的数量最少,此时,等距底螺旋的填充系数最大。

3.3 螺旋轴扭矩

变距螺旋与等距螺旋的结构不同。在输送多孔

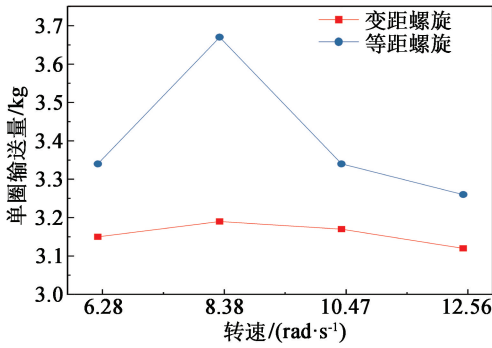


图 6 单圈输送量对比

Fig. 6 Comparison of single turn conveyance volume

粒状硝酸铵颗粒时,螺旋轴受力与扭矩也会发生变化。在离散元仿真软件后处理模块,选择螺旋轴进行扭矩仿真。以转速 8.38 rad/s 为例,取出料稳定的 11~14 s 仿真结果,扭矩对比情况如图 7 所示。将螺旋轴扭矩进行统计并计算,见表 5。

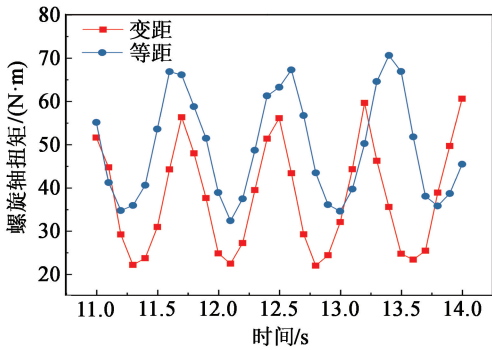


图 7 螺旋轴扭矩对比

Fig. 7 Comparison of screw shaft torque

表 5 螺旋轴扭矩

Tab. 5 Screw shaft torque

工况	$n/$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	螺距 类型	平均扭矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)	峰值扭矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)
1 [#]	6.28	变距	34.65	54.17
2 [#]	6.28	等距	39.22	58.90
3 [#]	8.38	变距	37.69	60.54
4 [#]	8.38	等距	54.93	81.50
5 [#]	10.47	变距	37.61	60.37
6 [#]	10.47	等距	43.67	68.70
7 [#]	12.56	变距	38.09	59.54
8 [#]	12.56	等距	44.84	70.80

整体来看,在相同转速条件下,变距螺旋的螺旋轴扭矩要普遍低于等距螺旋;转速为 6.28、8.38、10.47 rad/s 和 12.56 rad/s 时,变距螺旋的平均扭矩比相同转速条件下等距螺旋的平均扭矩分别低了 11.65%、31.39%、13.89%、15.05%,峰值扭矩分

别低了 8.03%、25.72%、12.13%、15.90%。两组数据都远高于相同转速条件下变距螺旋比等距螺旋的平均质量流量及单圈输送量的降幅,说明在输送同样多孔粒状硝酸铵质量的情况下,变距螺旋要更节能。

经计算,变距螺旋平均扭矩对应的 C_v 为 4.29%,而等距螺旋扭矩的 C_v 达到 14.52%,表明变距螺旋相较等距螺旋更稳定,等距螺旋更容易发生死区现象。

4 实验验证

2023 年,ESM-BCLH-15G 型智能化铵油炸药现场混装车研制成功。该车采用变距底螺旋进行计量,并在某项目部对该车底螺旋单圈输送量进行了多次标定。标定时,在混装车多孔粒状硝酸铵料仓中装填 10 t 干燥、蓬松的多孔粒状硝酸铵颗粒作为实验材料,并在计量底螺旋稳定运行 10、20 min 后,分别接取标定时间的多孔粒状硝酸铵,标定结果取平均值,如表 6 所示。表 6 中: t 为标定时间; m 为标定质量。

表 6 变距底螺旋单圈输送量标定参数

Tab. 6 Calibration parameters of single-turn conveyance volume of variable pitch bottom screw

$n/$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	$t/$ s	$m/$ kg	$q/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_0/$ kg
10.26	15	74.8	4.99	3.05
10.26	20	100.7	5.04	3.08
10.26	30	151.3	5.04	3.09
10.26	60	305.1	5.09	3.11
12.56	10	60.9	6.09	3.05
12.56	30	181.5	6.05	3.03

由表 6 可知,现场实际标定 Q_0 结果与仿真结果相接近,最大 Q_0 与最小 Q_0 波动比为 1.03,平均标定量比平均仿真量低 2.85%。充分表明该仿真模型准确度高、参数设置合理、仿真方法可靠,对定量底螺旋的开发有一定指导意义。

5 结论

利用离散元仿真软件建立了等距底螺旋与变距底螺旋输送的仿真模型。以输送质量流量稳定性变异系数 C_v 、螺旋单圈输送量 Q_0 以及螺旋轴扭矩 M 为评价指标,在不同转速条件下对两种模型的输送

稳定性进行了对比分析。

1)在相同转速条件下,变距底螺旋的输送质量流量的 C_v 要普遍低于等距底螺旋。混装车采用变距螺旋输送多孔粒状硝酸铵,输出质量流量更稳定。其中,在转速 8.38 rad/s 条件下的 C_v 为5.51%,稳定性最好。

2)在转速 8.38 rad/s 时,等距底螺旋的 Q_0 最大;在相同转速条件下,变距底螺旋的 Q_0 较等距螺旋要稳定, C_v 为 1.00%,受螺旋转速的影响较小。

3)在相同转速条件下,变距底螺旋的扭矩普遍低于等距底螺旋,平均扭矩对应的 C_v 为4.29%,较等距底螺旋更稳定、更节能。

参考文献

- [1] 冯有景. 现场混装炸药车[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- [2] 潘先峰. 铵油炸药混装车输送计量精度影响因素的探讨[J]. 矿山机械, 2020, 48(2): 11-14.
PAN X F. Discussion on influential factors of metering accuracy of ammonium oil explosive mixed loading truck [J]. Mining & Processing Equipment, 2020, 48(2): 11-14.
- [3] 田惺哲, 张鑫, 黄麟. 一种改进铵油炸药混装车计量精度的方法[J]. 工程爆破, 2019, 25(4): 80-84.
TIAN X Z, ZHANG X, HUANG L. A kind of the method for improving measurement accuracy of ANFO mixed truck [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 80-84.
- [4] 孙伟博, 王燕, 李治明, 等. 现场混装炸药车螺旋计量控制优化[J]. 矿山机械, 2013, 41(7): 23-25.
SUN W B, WANG Y, LI Z M, et al. Optimization on screw metering control of on-site mixed explosive vehicle [J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(7): 23-25.
- [5] 张春明, 李航. BC型露天矿装药车螺旋输送装置计量系统的改进[J]. 矿山机械, 2011, 39(4): 136-137.
ZHANG C M, LI H. Improvement of the metering system for the screw conveyor unit of BC explosive carrying vehicle used in stripmine [J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(4): 136-137.
- [6] 于魏清. 浅谈铵油炸药混装车计量精度现状及解决途径[J]. 煤矿爆破, 2017(5): 24-27.
YU W Q. A brief discussion on the measurement accuracy status and solutions of ANFO mixing vehicle [J]. Coal Mine Blasting, 2017(5): 24-27.
- [7] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术, 2010(1): 29-33.
XIANG D Z, XU Y W. Design parameter selection of spiral conveyer [J]. Cement Technology, 2010(1): 29-33.
- [8] 王震民, 夏朝勇, 贾煜. 变螺距螺旋结构与仿真分析[J]. 现代食品, 2022, 28(12): 21-25, 37.
WANG Z M, XIA C Y, JIA Y. Design and simulation analysis of variable pitch helical structure [J]. Modern Food, 2022, 28(12): 21-25, 37.
- [9] 郭创, 朴香兰. 基于EDEM的螺旋输送机数值模拟分析[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 179-182.
GUO C, PIAO X L. Numerical simulation analysis for screw conveyor based on EDEM [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2018, 44(2): 179-182.
- [10] 吴超, 吴努, 胡志超. 基于DEM的螺旋输送机模拟仿真[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 92-94, 115.
WU C, WU N, HU Z C. Simulation of the screw conveyor based on the DEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2): 92-94, 115.
- [11] 盛泉宝, 姜新波, 纪欣鑫, 等. 基于EDEM的倾式单螺旋排肥器排肥性能仿真分析[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(6): 55-60.
SHENG Q B, JIANG X B, JI X X, et al. Performance simulation analysis of inclined single screw fertilizer apparatus based on EDEM [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(6): 55-60.
- [12] 郭华, 周健, 张金建, 等. 基于离散单元法的氢氧化锂粉末螺旋输送机优化设计[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 237-245.
GUO H, ZHOU J, ZHANG J J, et al. Optimization design of the lithium hydroxide powder screw conveyor based on the discrete element method [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2023, 49(2): 237-245.