粉状危化品计量系统的加料方式

范兰兰[1]，张国全[1]，王立宗[2]，祖逸伦[1]，赵险峰[1]
（1.武汉轻工大学，武汉 430048；2.华中农业大学，武汉 430070）

摘要：目的 以粉状危化品计量系统中的加料方式为研究对象，研究一种流动性差的危化品物料的加料方式。**方法** 从安全性角度分析现有强制性螺旋加料和振动加料不适合粉状危化品加料的原因；根据慢加料原理，提出激励加料方式，构建其工作原理和结构，并通过控制振动源启停和振动频率，以及加料门的开合角度来实现快慢均匀加料；采用离散元仿真软件对慢加料过程进行仿真，分析物料连续均匀下落所需的振动力，得到加料流量与振动频率、振幅和出料口尺寸的关系。**结果** 激励加料方式适合于粉状危化品加料，能满足其加料要求。**结论** 基于上述结论，设计和制造了加料设备，试验结果表明，该装置完全满足计量系统中快慢加料的要求，对同类型的物料加料具有一定的指导意义。

关键词：粉状危化品；计量系统；激励加料；离散元仿真
中图分类号：TB486+.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)09-0312-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.038

Feeding Method of Metering System for Powdery Hazardous Chemicals

FAN Lan-lan[1], *ZHANG Guo-quan*[1], *WANG Li-zong*[2], *ZU Yi-lun*[1], *ZHAO Xian-feng*[1]
(1. Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China; 2. Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a feeding method for hazardous chemical materials with poor fluidity with the feeding method in the metering system of powdery hazardous chemicals as a research object. From the perspective of safety, the reasons why the existing mandatory screw feeding and vibration feeding was not suitable for feeding powdery hazardous chemicals were analyzed. According to the principle of slow feeding, an incentive feeding method was proposed, and its working principle and structural composition were constructed. By controlling the start and stop of the vibration source and the vibration frequency, as well as the opening and closing angle of the feeding door, fast, slow and uniform feeding was realized. Then the discrete element simulation software was used to simulate the slow feeding process, and the vibration force required for uniform and continuous falling of materials was analyzed. The relationships between the feeding flow and the vibration frequency, amplitude and size of the outlet were obtained. The incentive feeding method was suitable for the feeding of powdery hazardous chemicals and could meet the feeding requirements. Based on the above conclusions, the feeding equipment is designed and manufactured. According to the testing, the device fully meets the requirements of fast and slow feeding in the metering system. This method has certain guiding significance for feeding the same type of materials.

KEY WORDS: powdery hazardous chemicals; metering system; incentive feeding; discrete element simulation

近年来，粉状危化品的应用日益广泛，对其自动包装技术的需求也日益迫切。我国自 20 世纪 80 年代从国外引进了一批粉状物料定量填充机以来，目前已能自主研发多种物料的包装设备，且具有较高的包装

收稿日期：2022-07-06
作者简介：范兰兰（1987—），女，硕士，实验员，主要研究方向为自动化包装机械设计。

速度和包装精度[1]。由于粉状危化品具有易制毒、易燃、易爆、易腐蚀等危害特性[2]，因此对人体、设备及环境都会产生危害。由于此类物料的生产企业大部分依然采用人工方式来完成物料的包装操作，因此机械自动化程度低，并且存在严重的安全隐患。

文中的研究对象为某种粉状危化品物料，它是一种摩擦因数大、爆速快的危化品。目前，在借鉴国内外先进的包装技术和包装理念的基础上，我国民用爆破器材行业的工业炸药包装领域已实现了工业炸药的全自动包装生产，以及在线无人操作。例如，广东振声包装技术有限公司研发的 MRZ−011 型自动包装生产线[3]，实现了工业乳化炸药的全自动化包装。目前，针对粉状危化品包装的研究仍未取得较大进展，主要表现：针对粉状危化品计量中的本安型供料方式缺乏深入研究；新技术的应用还有待进一步提高，我国包装机械行业大多沿用传统的包装工艺和包装技术，对高新技术缺乏全面、系统的认识[4]。

随着国家大力发展智能化制造，设备自动化的普及率越来越高，国内相关行业对粉状危化品的生产自动化需求也越来越迫切。在此背景下，笔者项目组针对粉状危化品计量系统中的核心技术——加料方式进行研究，提出流动性差的粉状危化品激励加料方法，拟对危化品的安全计量设计和应用提供一定的技术借鉴。

1　常见加料装置的工作原理

常见物料计量的加料装置被固定在用户现场料仓下方，其加料过程主要分为快进料和慢进料 2 个阶段，工艺流程如图 1 所示。

如图 1 所示，在开始加料前，系统需检测料仓中有无所需的物料量（一般不少于 5 包的包装量），以及计量斗门和加料门是否皆已关闭。若计量斗门和加料门为开启状态，则等待，直至 2 门均关闭后才开始加料动作。首先将快加料门打开，当加料量达到设定值 G_1 时，快加料门关闭。同时开启慢加料，直至慢加料到设定值 G_2 时慢加料结束，表明计量加料过程结束。

通过上述加料过程可以看出，若要保证加料速度和计量精度，则加量装置在加料时的加料量需可控，且加料均匀。根据工程经验，加料均匀度误差不得大于 5%。

2　加料方式

2.1　现有加料方式分析

这里研究的物料为粉状危化品，粒度较小，平均粒径小于 0.2 mm。物料在物料颗粒之间的黏附力、摩擦力等作用下容易凝结成团，造成物料的流动性较差、易吸潮，在料仓中极易形成“结拱”现象[5]。由于危化品物料对冲击和静电等的敏感度较高、爆速快，在加料过程中应着重考虑这些因素。

在计量充填系统中，常见物料的加料方式主要有重力自流式和强制式 2 种[2]。其中，重力自流式加料依靠物料自身重力，通过加料装置引导物料自由落入计量斗中。对于流动性好的物料一般采用重力自流式加料方式。强制性加料方式分为螺旋推送式和电磁振动式 2 种，适用于流动性差、易吸潮、易结拱的物料。螺旋式加料[6-7]通过埋在物料内的螺旋轴旋转，产生轴向推力，将螺旋叶片内的物料强制推入计量斗内，其间易产生摩擦。由于螺旋叶片与螺旋壳体存在间隙（2~4 mm），其内物料不易被清理，所以此方式不适用于粉状危化品的计量供料。电磁振动式供料[8]通过振动将其上托盘内的物料向前抛送。若粉状物料采用电磁振动式充填加料，则易引起粉尘飞扬，所以该方式仅适合于易碎、具有少粉尘含量的物料。

综上所述，根据加料原理和粉状危化品的物料特性，可以得出此物料加料方式不适合采用如上重力自流式和强制性加料方式，需要研究一种全新的加料方法来实现粉状危化品的自动计量充填。

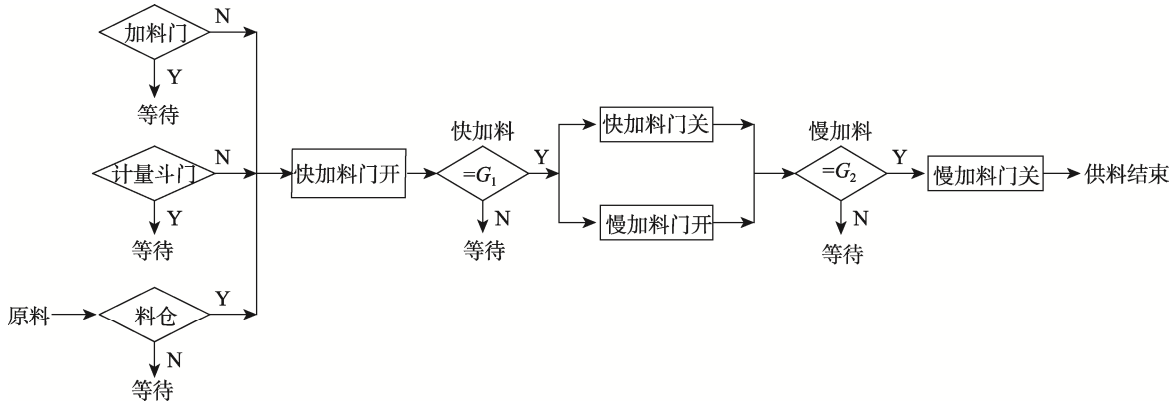

图 1　加料工艺流程
Fig.1 Feeding process flow

2.2　加料方式保证措施

为了满足粉状危化品的加料要求，其加料方式需满足以下 3 个条件。

1）不易结拱。指能保证物料在料仓和供料装置内不易形成拱形。

2）快慢加料柔性切换。指加料方式具有快慢加料功能，对计量斗的冲击小。

3）自流性好。指物料在慢加料过程中能均匀下落。

下面就从这 3 个方面来说明加料方式的结构设计。

2.3　加料方式满足条件

2.3.1　破拱结构设计

在此系统中，导致物料可能结拱的区域主要有料仓、加料斗等部位，为此，从料仓和加料斗的结构设计着手，分析消除物料流动性不畅的方法，并采取相应措施。

2.3.2　料仓结构分析与设计

影响物料结拱的因素主要有料仓的结构形状、物料的物理特性及存储时间。物料的物理特性包括颗粒大小、颗粒形状、颗粒间的摩擦角、颗粒与料仓壁的摩擦角及压实程度等。

基于上述影响因素，在料仓内存放流动性不好的粉状物料时，将料仓结构设计为对称式。经过一段时间后，粉状物料在料仓出料口区域易形成拱形结构[5]，从而出现粉状物料在加料过程中难以顺畅匀速排出的现象。此结拱形式如图 2 所示。

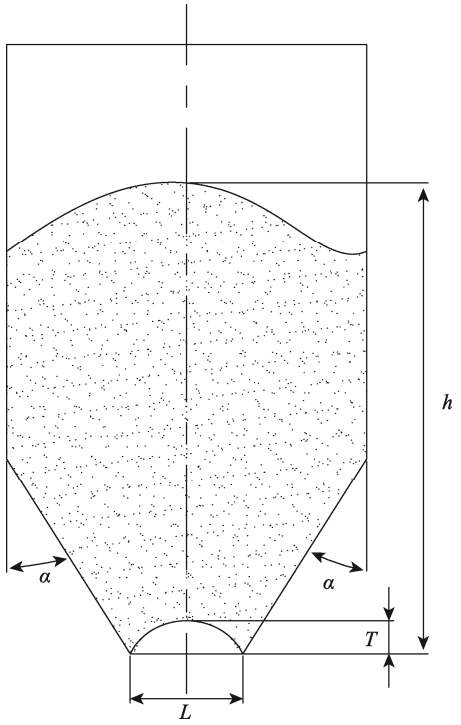

图 2　物料在料仓内结拱
Fig.2 Arched material in the silo

国内外许多学者先后对结拱的形成机理进行了研究，其中文献[9]中提到北京农业工程大学张学雁教授等研究了物料在料仓中的结拱条件，如式（1）所示。

$$\frac{k\rho hL}{2d\sin(\varphi+\alpha)}<n\sigma_{\mathrm{q}} \tag{1}$$

式中：k 为相关系数，常取 k 为 1.2；ρ 为物料的密度；h 为物料层的高度；L 为出料口长度；d 为料拱的厚度；φ 为摩擦角；α 为料仓侧壁与铅垂面的夹角，简称倾斜角；n 为修正系数；σ_{q} 为 1/4 无侧限屈服强度。

由式（1）可以得出，出料口的尺寸 L 越大，料仓侧壁的倾斜角度 α 越小，物料则不容易发生结拱现象。文献[10]提到，为了满足某种危化品等流动性差的物料能够自由地落入下料口，料仓口的长度和宽度应大于物料产生“断料架桥”的结拱极限尺寸（168 mm），料仓侧壁与铅垂面夹角 α 须满足 $\alpha\leqslant 28.9°$。

根据上述要求，这里采用垂直面与倾斜面结合的结构形式，设计的加料料仓如图 3 所示。在满足料仓储存量一定的条件下，倾斜面有 2 个（图 3a），对应的倾斜角为 α_1。如图 3b 所示，倾斜面的倾斜角 α_2 必须满足式（2）。

$$\alpha_1=\alpha_2\leqslant\alpha \tag{2}$$

由式（2）可以得出图 3 中的料仓高度 H，以及出料口的尺寸 L_1 和 L_2。

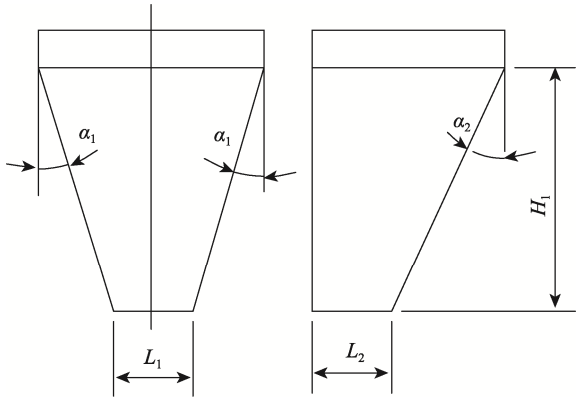

图 3　料仓结构
Fig.3 Silo structure

2.3.3　加料斗组件的设计

为了保证计量的速度和精度要求，在加料过程中一般有快慢加料 2 个阶段。采用快加料方式来保证速度，采用慢加料方式来保证精度。加料斗与固定在其下的弧形门的配合是实现快慢加料的重要关键，且加料斗的结构形式对加料均匀性的影响较大。

2.3.3.1　加料斗组件的组成

加料斗组件的外形结构如图 4 所示。该组件主要由加料斗 1、驱动轴 2 和扇形门 3 等组成。其中，G_1

和 G_2 分别为加料斗上部的长度和宽度；G_3 为加料斗下部的宽度；R_1 为扇形门的旋转半径；R_2 为加料斗下部的弧形半径；β 为扇形门的开度角；λ 为加料斗底部的弧形角；γ 为扇形门的弧形角；δ 为扇形门与加料口底部的间隙距离；D 为扇形门驱动轴与加料斗左侧的距离；φ_1、φ_2 为加料斗上部斜面与铅垂面的左右夹角。

说明：通过扇形门 3 的开度 β 的变化来改变加料口的大小，从而实现快慢加料过程。在快加料时将扇形门完全打开，物料从加料斗底部的出料口（长为 G_3，宽为 G_2）排出；在慢加料时，将扇形门关闭到一定程度，物料从扇形门上的小槽缺口（长为 P_2，宽为 P_1）排出。

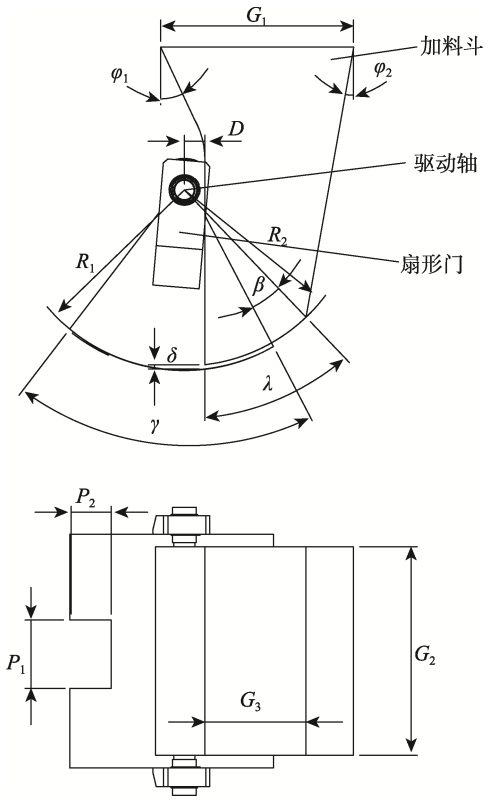

图 4　加料斗和扇形门的结构参数示意图
Fig.4 Schematic diagram of structural parameters for hopper and sector door

2.3.3.2　加料斗组件结构参数确定

为了保证加料顺畅，采用如图 4 所示的加料斗外形结构，需满足的条件见式（3）—（6）。

$$\varphi_1 < \varphi_2 < \alpha \tag{3}$$

$$D \geqslant 20 \tag{4}$$

$$\delta \geqslant 4 \tag{5}$$

$$R_1\gamma \geqslant R_2\lambda + p_2 + (10\sim15) \tag{6}$$

说明：式（3）中加料斗两侧板斜边的倾角 φ_1、φ_2 须小于 α，可确保物料在其内不易结拱，易于从加料斗底部的出料口（长为 G_3，宽为 G_2）排出。其次，驱动扇形门摆动的驱动轴安置在离加料斗左侧面距离为 D 的位置，可保证驱动轴不通过加料斗内中部位置，这会降低结拱和堵料的风险。式（4）定义了驱动轴 2（常取 D=25 mm）与加料斗最近的侧壁之间的距离，此距离的存在可保证两者之间不存在摩擦。式（5）定义了扇形门内表面与加料斗底部之间的间隙不小于 4 mm，其目的是防止和避免两者之间的摩擦风险。式（6）定义了扇形门的弧度，纵然有间隙 δ 的存在，也可确保扇形门关闭后，加料斗内的粉状物料也不易落入计量斗中（在结构满足的前提下，扇形门的弧长留有 10~15 mm 的余量）。

按上述要求设计的加料斗结构，可保证在快加料时粉状物料均匀地落入其下的计量斗中；在慢加料时，为了保证计量精度，P_1 与 P_2 构成的加料区域面积有限，对于流动性差的粉状物料，可能导致加料失败。为此，这里采用激励措施，在加料斗侧壁固定 1 个小型的气动振动器，通过调整进气量改变振动频率，其结构如图 5 所示。

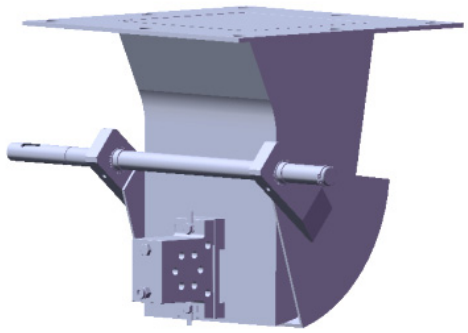

图 5　加料斗组件结构示意图
Fig.5 Structural diagram of hopper assembly

目前，国内外应用较广泛的破拱装置有仓壁安装振动破拱器、气力助流破拱器[11]，这里的激励加料选择气动式振动器。将振动器安装在料仓侧壁靠近加料口的位置，根据危化品的加料要求选择气动振动器。

2.3.4　快慢加料柔性切换

在快慢加料过程中，为了保证包装速度，一般快加料量为总料量的 95%左右，其加料时间为总时间的 1/3 左右（通常时间的分配根据充填速度的改变而改变）。大流量物料在短时间内落入计量斗内，易于造成称重传感器检测信号出现超载现象，导致系统未达到设定重量就停止供料。

为了解决物料对计量斗的冲击问题，在加料时间一定的前提下，通过改变快加料气缸活塞杆的运动速度，实现扇形门的打开和关闭，保持匀加速和匀减速，物料的加料量等加速增多或等减速减少。加料流量与时间的关系如图 6 所示。

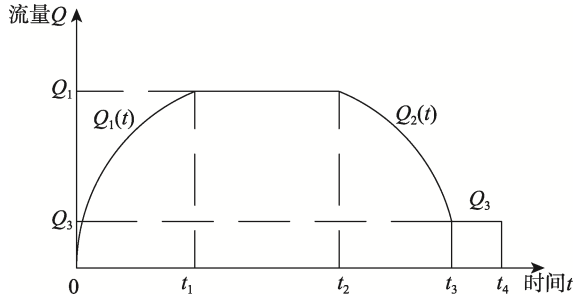

图 6　流量与时间的关系
Fig.6 Relationship between flow and time

0~t_1 时间段为加料门从关闭状态到匀速打开阶段，在单位时间内的加料量为 $Q_1(t)$，它是随时间变化的变量。t_1~t_2 时间段为加料门完全打开状态阶段，在单位时间内的加料量为一定量。t_2~t_3 时间段为加料门逐渐关闭至慢加料阶段，在单位时间内的加料量为 $Q_2(t)$，也为变量。t_3~t_4 时间段为慢加料阶段，物料从加料门的小槽口排出。整个阶段的加料流量表达式见式（7）。

$$Q=\int_0^{t_1}Q_1(t)\mathrm{d}t+Q_1(t_2-t_1)+\int_{t_2}^{t_3}Q_2(t)\mathrm{d}t+Q_3(t_4-t_3) \quad (7)$$

由式（7）可知，此方式能实现连续加料，且缓解了大流量对计量斗的冲击。

3　慢加料仿真分析

粉体是由大量颗粒及颗粒间的空隙所构成的集合体[12]。颗粒是构成粉体的最小单元，在工程上研究粉体，一般研究微观颗粒。由于粉体物料的运动情况非常复杂，因此用现有的基本理论很难解释清楚。离散元素法将粉体分离为单一颗粒的集合，对单一颗粒进行运动分析，再采用迭代法求解，从而得出整个粉体物料的运动情况，因此离散元素法适用于粉体的运动求解问题[13]。

3.1　料仓的力学分析

基于 GT-25 气动振动器参数，振动器输入的振动力为交变的，如图 7 所示。振动力的峰值为 5 kN，针对振动器处于峰值的工况，对料仓管壁振动情况进行了模态仿真分析，得出振幅峰值为 3.5 mm，该峰值出现在 $T/2$ 和 T 时刻（T 为 1 个振动周期），如图 8 所示。同理，对料仓管壁受到振动力 2.1 kN 时进行了模态仿真分析，得到的振幅峰值为 1.7 mm。

3.2　仿真模型

根据料仓受到振动过程中的应力分布及振动区，在 SolidWorks 中建立料仓模型，然后导入离散元仿真软件中，如图 9 所示。物料颗粒的直径为 0.2 mm，料仓中填满的物料颗粒数达到上千万个甚至上亿个，一般普通计算机的计算能力有限，无法进行有效模拟，故采用颗粒缩放法对物料颗粒的仿真参数进行标定。

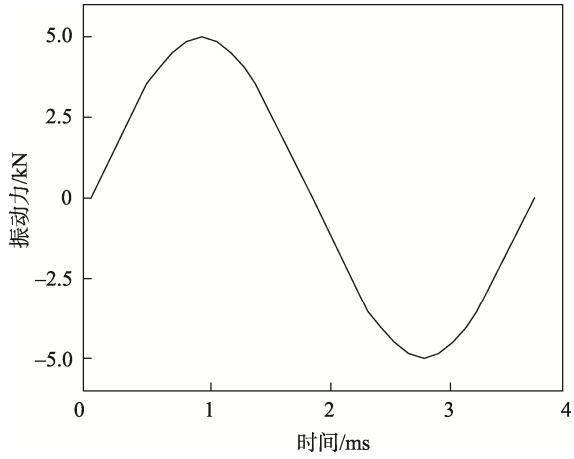

图 7　仿真输入振动力变化
Fig.7 Simulation of input vibration force changes

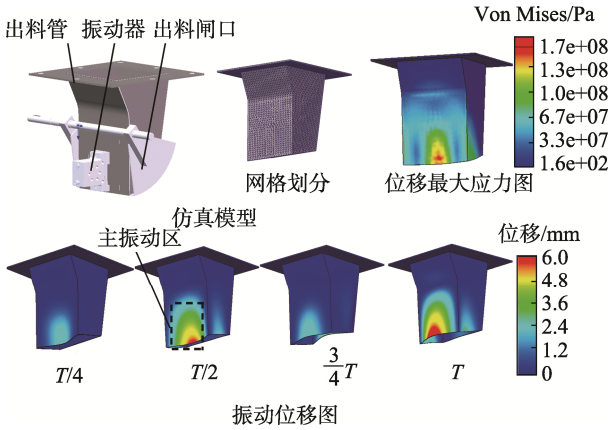

图 8　料仓受到振动时的应变分析
Fig.8 Analysis on vibration strain of silo

为了提高仿真结果的准确性，以及尽可能节省计算时间，缩放比例根据相关文献[14-15]，将物料颗粒放大 10 倍后进行模拟仿真，得到的物料模型如图 10 所示。标定的物料仿真参数：物料密度为 2 250 kg/m^3，泊松比为 0.25，剪切模量为 1×10^8 Pa；不锈钢的密度为 7 800 kg/m^3，泊松比为 0.25，剪切模量为 7.9×10^{10} Pa；物料-物料恢复系数为 0.2，静摩擦因数为 0.65，滚动摩擦因数为 0.1；物料-不锈钢恢复系数为 0.2，静摩擦因数为 0.72，滚动摩擦因数为 0.1；JKR 的系数为 0.15。

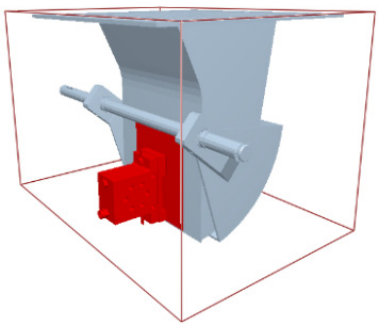

图 9　料仓模型
Fig.9 Silo model

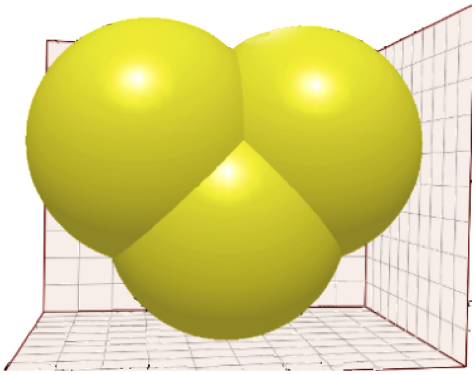

图 10　物料颗粒模型
Fig.10 Material particle model

影响激励加料物料流量的因素有振动频率、振幅和开口尺寸等 3 个因素。为了研究这些因素对流量的影响，并尽可能减少试验次数，采用正交试验设计，每个因素考虑 2 个水平（如表 1 所示），一共进行 2^3 组仿真试验（如表 2 所示），正交试验结果分析如表 3 所示。

表 1　因素水平
Tab.1 Factor level

水平	因素		
	振幅（A）/mm	频率（B）/Hz	开口尺寸（C）/mm
1	1.7	250	50×10
2	3.5	500	50×20

表 2　正交试验
Tab.2 Orthogonal test

序号	A	B	C
E1	1	1	1
E2	1	2	2
E3	2	1	2
E4	2	2	1
E5	2	1	1
E6	1	2	1
E7	1	1	2
E8	2	2	2

3.3　后处理及结果分析

在后处理模块中提取上述 8 组仿真试验加料过程中流量随时间变化的折线，以及振动器模块的振动力变化情况，分别如图 11—12 所示。增加 1 组无振动小加料口的仿真试验 E01，其流量时间变化如图 13 所示。由流量时间图可以看出，激励加料可以实现连续均匀加料，如不加振动，依靠物料自身重力则很难排出，这验证了粉状物料在料仓中易结拱、难以加料的情况。由振动力–时间关系图可知，在慢加料时，物料颗粒所受的振动力最大，为 146 N。可见，只要物料颗粒受到的力大于 146 N，就能实现稳定、连续、均匀加料。

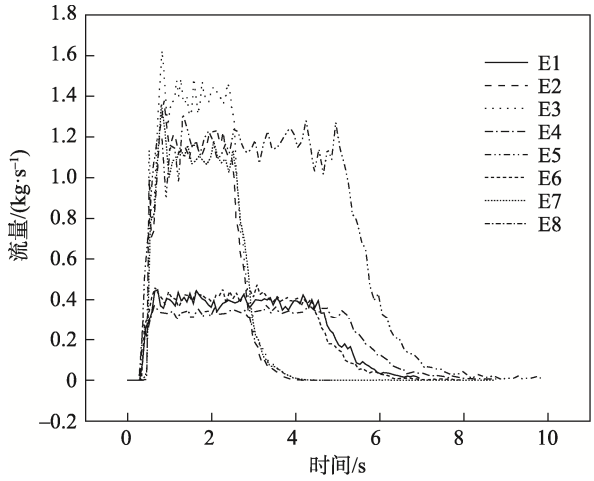

图 11　流量–时间关系
Fig.11 Relationship between flow and time

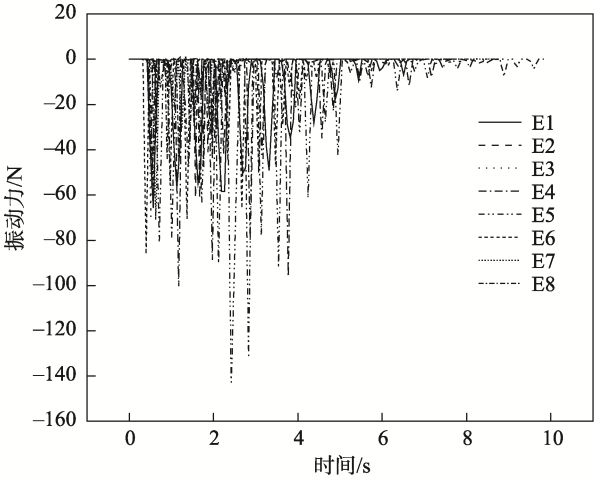

图 12　振动力–时间关系
Fig.12 Relationship between vibration force and time

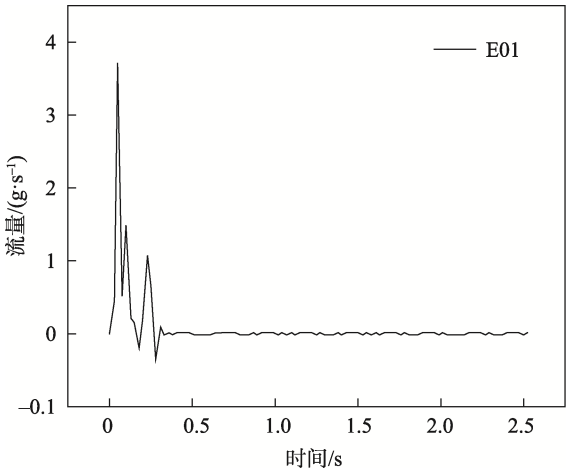

图 13　无振动流量–时间关系
Fig.13 Relationship between non-vibration flow and time

表 3　正交试验结果分析
Tab.3 Analysis of orthogonal test results

组别	因素			
	振幅（A）/ mm	频率（B）/ Hz	开口尺寸（C）/mm	流量/ (kg·s^{-1})
E1	1	1	1	0.39
E2	1	2	2	1.17
E3	2	1	2	1.39
E4	2	2	1	0.34
E5	2	1	1	1.13
E6	1	2	1	0.42
E7	1	1	2	1.11
E8	2	2	2	1.17
K_1	3.09	4.02	2.28	
K_2	4.03	3.10	4.84	
R	0.94	0.92	2.56	
优方案	A2	B1	C2	

R 为极差，极差最大的为 R_C，可见对试验结果影响最大的因素为开口尺寸，即影响加料流量的主要因素。$R_C > R_A > R_B$，可见各因素从主到次的顺序为开口尺寸、振幅、频率。

4　激励供料装置的结构

4.1　激励供料装置的模型

激励供料装置的三维模型如图 14 所示。供料装置的内壁光滑，无凸起、翘曲。各运动件之间固定牢靠、无相对运动，将快慢气缸置于驱动密封室内，将加料斗等组件安装在加料密封室内，则外界的粉尘和空气不会进入供料装置内部。在用户料仓侧壁安装气动敲击锤以辅助加料，在最底部的过渡料斗内部安装导静电轴，吸收物料在加料过程中产生的静电，从而保障供料安全。

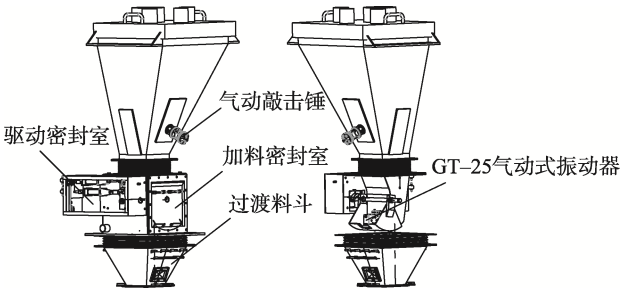

图 14　激励供料装置三维模型
Fig.14 3D model of vibrating feeding device

4.2　现场试验及结论

为了进一步验证该激励加料方式能够实现危化品安全稳定的加料及加料量的稳定性，需要进行现场试验验证（如图 15 所示），测量在一定加料时间内的加料量。受到测试条件的限制，此次试验选用的物料为与实际危化品物理性质较为相似的粉料，以测试慢进料过程的加料量。此外，准备 1 个量程为 50 kg、精度为 0.1%的电子秤。

a GT–20气动振动器　　b GT–25气动振动器

图 15　现场试验
Fig.15 Field test

根据仿真结果可知，料仓内的物料充足，并在气动振动器的作用下，慢下料口的尺寸为 50 mm×10 mm，以慢进料阶段 10 s 内的理论加料量为 4.2 kg 为评判标准，计算其供料的均匀性。测试步骤如下。

1）保持料仓内壁清洁光滑，不加料启动振动器 10 min，观察组件的运转情况。

2）关闭振动器，向料仓内加物料，待物料填满料仓时压实物料。

3）启动振动器并开始计时，每 10 s 后暂停振动器，测试加料的质量，每组测试 15 次。

4）统计数据，去掉第 1 组和最后 1 组，随机抽取 5 组数据记录，并整理现场。

根据表 4 可知，加料均匀度误差率均在 5%以内，说明此激励加料方式符合加料要求。此外，为了验证振动器选型符合加料要求，现场试验增加了 1 组 GT−20 气动振动器加料试验，试验数据如表 5 所示。

表 4　GT−25 慢进料运行测试情况记录
Tab.4 Records of GT-25 slow feed running test

序号	理论加料质量/kg	试验加料质量/kg	加料均匀度误差率/%
1	4.2	4.05	3.6
2	4.2	4.12	1.9
3	4.2	4.19	0.2
4	4.2	4.27	1.7
5	4.2	4.08	2.9

表 5　GT−20 慢进料运行测试情况记录
Tab.5 Records of GT-20 slow feed running test

序号	理论加料质量/kg	试验加料质量/kg	加料均匀度误差率/%
1	4.2	3.85	8.3
2	4.2	3.753	10.6
3	4.2	3.81	9.3
4	4.2	3.674	12.5
5	4.2	3.78	10

根据表 5 可知，加料均匀度误差率均超过 5%，说明 GT−20 气动振动器提供的振动力不够，其加料量达不到要求。

5　结语

针对粉状危化品的物理和化学性质，提出了一种激励连续变速供料方案，设计了一种加料斗与扇形门配合的方法实现快慢加料的加料结构，并通过在加料斗侧壁固定 1 个小型气动振动器，以解决慢下料时不易出料的问题。此加料结构完全满足粉状危化品计量系统中快慢加料的要求，该技术对同类型物料的包装生产具有重大意义，并已在相关领域得到应用。

参考文献：

[1] 张国全，董结. 重力称重式充填机三段式加料系统原理的研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 189-193.
ZHANG Guo-quan, DONG Jie. Study on the Theory of Three Stages Type Material Feeding System of Gravity Gravimetric Filling Machine[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 189-193.

[2] 郭宁，张国全，黎厚斌，等. 小颗粒状危化品计量系统中的加料方式[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 159-163.
GUO Ning, ZHANG Guo-quan, LI Hou-bin, et al. Feeding Mode of the Measurement System of Small Granular Hazardous Chemical Substance[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 159-163.

[3] 张国全，梅文清，董结，等. 民爆中包包装和装箱全自动生产线的方案设计[J]. 轻工机械，2006，24(4): 161-164.
ZHANG Guo-quan, MEI Wen-qing, DONG Jie, et al. Conceptual Design of Automation Production Line of Industrial Explosive Secondary Packing[J]. Light Industry Machinery, 2006, 24(4): 161-164.

[4] 王帆. 粉状危化品双层包装袋内袋扎口装置的设计[D]. 武汉：武汉轻工大学, 2016: 3.
WANG Fan. Design of Inner Bag Tying Device for Powder Hazardous Chemicals Double-Layer Packaging Bag[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016: 3.

[5] 周波，史宏. 料仓内物料的结拱原理及破拱设计[J]. 企业技术开发, 2001, 20(4): 7-9.
ZHOU Bo, SHI Hong. Arch-Forming Principle and Arch-Breaking Design of Materials in Silo[J]. Technological Development of Enterprise, 2001, 20(4): 7-9.

[6] 张麟. 面粉包装机的螺旋供料器设计[J]. 机械与设计, 1997(6): 27-28.
ZHANG Lin. Design of the Screwy feed Appliance of the Flour Packer[J]. Food & Machinery, 1997(6): 27-28.

[7] 周丹，方先其，王利强，等. 一种超细粉充填计量结构研究[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(6): 37-41.
ZHOU Dan, FANG Xian-qi, WANG Li-qiang, et al. Study on a Filling and Metering Mechanism for Ultrafine Powder[J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(6): 37-41.

[8] 王高峰，王艳平，李光辉. 电磁振动给料器的设计[J]. 起重运输机械, 2017(4): 43-46.
WANG Gao-feng, WANG Yan-ping, LI Guang-hui. Design of Electromagnetic Vibration Feeder[J]. Lifting and Transportation Machinery, 2017(4): 43-46.

[9] 王顺喜. 筒式饲料仓结拱机理及破拱技术的研究现状[J]. 粮油加工与食品机械, 1992(3): 25-28.
WANG Shun-xi. The Research Status of Arch Formation Mechanism and Arch Breaking Technology in Bucket Feed Silos[J]. Grain and Oil Processing and Food Machinery, 1992(3): 25-28.

[10] 汪庆华，邓国栋，李大勇. 黑索金粉料安全、连续加料与计量装置[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 95-98.
WANG Qing-hua, DENG Guo-dong, LI Da-yong. Research on Safely and Continuously Feeding and Metering Device of RDX Powders[J]. China Powder Science and Technology, 2015, 21(4): 95-98.

[11] 方奕格，刘亚俊. 粉料输送过程机理及优化控制技术研究[D]. 广州：华南理工大学，2019: 3-4.
FANG Yi-ge, LIU Ya-jun. Research on the Mechanism and Optimization Control Technology of Powder Transportation Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 3-4.

[12] 郝友莉. 粉体包装螺旋式密实输送研究[D]. 无锡：江南大学, 2017: 7-10.
HAO You-Li. Research on Densifying Transportation of Spiral Powder Packaging Machine[D]. Wuxi: JiangNan University, 2017: 7-10.

[13] 李飞翔. 小麦粉螺旋给料装置的优化设计与试验研究[D]. 郑州：河南工业大学，2020: 40-44.
LI Fei-xiang. Optimization Design and Experimental Research on the Spiral Feeding Device for Wheat Flour[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 40-44.

[14] 周龙海. 垂直螺旋输送的 EDEM 仿真与实验研究[D]. 杭州：浙江工业大学, 2017: 7-18.
ZHOU Long-hai. EDEM Simulation and Experimental Study on Vertical Spiral Conveying[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017: 7-18.

[15] KUMAR S, SAINI C S. Study of Various Characteristics of Composite Flour Prepared from the Blend of Wheat Flour and Gorgon Nut Flour[J]. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2016, 9(4): 679-689.

责任编辑：彭颋