

包装技术与工程

基于离散元法的料门式给料器料门受力研究

刘妹琴

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 研究料门式给料器工作中颗粒物料对料门的作用力,以便选择合适的驱动机构。**方法** 对给料器结构进行合理简化后,利用离散元法借助PFC3D软件,仿真计算料门完全关闭时受颗粒物料的作用力;将料门及实现其转动的辅助机构合理简化为杆件机构,分析料门在几个关键位置所需的驱动力。**结果** 颗粒物料对料门垂直方向的合力始终小于其自身的重力,而且随着颗粒物料高度的增加此现象会变得更加明显;料门受到颗粒物料的正压力和切向静摩擦力,随着料斗内料位高度的增加最初呈线性增大,后转为非线性并趋于极限值,而且变化过程与料斗结构也有一定关系;料门在完全关闭状态打开料门所需的摆动臂驱动力约为115 N,在精给料时维持精给料位置所需限位臂驱动气缸的推力约为553 N。**结论** 设计料门式给料器时只需计算一定料位高度的料门受力,超过此高度后物料继续增多时料门受力基本不变;使用的料门式给料器采用的气缸驱动力足够大,能够保证正常工作。

关键词: 给料器; 料门; 离散元; 驱动力

中图分类号: TB486+.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)19-0038-07

Force Analysis of the Material Door of Door-form Feeding Mechanism Based on Discrete Element Method

LIU Mei-qin

(Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to research the force of granular material in door-form feeding mechanism on the material door, so as to choose appropriate drive mechanism. After reasonable simplification of the feeding mechanism structure, PFC3D based on DEM was used to calculate the force on material door exerted by granular material when the material door was completely closed, then the material door and its associated mechanism were simplified into bar mechanism, and the required driving force in several key positions of the material door. The results showed that the vertical direction force suffered by the material door was always smaller than the material gravity, and this phenomenon became more significant with increasing material height. The positive pressure and tangential static friction of the door suffered from material increased linearly with the increase of material height, then increased nonlinearly, and final it tended to approach a limit value. This change had a relationship with the structure of hopper. When the door was fully closed, the oscillating lever force required to open the door was about 115N. At the accurate feeding position, the limiting lever force required to maintain the accurate feeding was about 553N. When designing door-form feeder mechanism, the force suffered by the material door was only needed to be calculated at a certain material height, with further increase of material height the force of material door suffered from material kept almost constant. In the feeding mechanism used in this paper, the cylinder could provide sufficient driving force to ensure the proper functioning of the mechanism.

KEY WORDS: feeding mechanism; material door; DEM; driving force

料门式给料器是食盐、小麦等流动性较好的颗粒状物料自动定量包装机广泛使用的一种重力式给料

收稿日期: 2015-02-02

作者简介: 刘妹琴(1965—),女,河北大城人,天津科技大学校办产业中心工程师,主要研究方向为机械设计与制造、企业管理等。

机构,用于定量将料斗内物料供给待包装袋,其给料原理是利用弧形料门控制出料口的大小^[1],实现给料及其速度的调节。在给料器工作过程中,其料斗及其上方的料仓内储存有大量的颗粒物料,会对料门产生一定的作用力。作用力的大小与料斗内物料的质量、摩擦因数、料位高度及料斗结构等有关^[2]。由于颗粒物料对料门的作用力,使得料门需要有足够的驱动力来实现打开和关闭。

对于仓闸门或仓底的压力,Г.К.克列因^[3]、黄松元^[3]虽然提出了相应的计算公式,但是公式比较复杂,且仅适用于直筒料仓底部的受力计算,故应用受到限制。设计料门式给料器时通常均需要考虑料门的受力,以便选择合适的驱动机构,目前设计人员多采用经验估计的方法来估计料门受力,从而设计相应的驱动机构,但经验估计不准确且有较大的局限性,因此,选择准确可靠的方法计算料门受力显得十分必要。研究发现,诞生于20世纪70年代的颗粒离散元法可以更好地解决半流体颗粒流的力学问题,是散体力学行为的重要数值分析方法^[4-7],自问世以来在颗粒散体工程中发挥了其他数值算法不可替代的作用^[6]。目前已有大量研究利用离散元法解决颗粒流问题。Yanjie Li^[8]和Y.C. Zhou^[9]用离散元分别研究了沙堆模型和散料休止角,并与实验进行了比较;N. Djordjevic^[10]利用离散元法模拟了散料在滚筒内的运动形态;杜明芳^[11]用离散元法仿真计算了筒仓的压力;徐泳^[12]则用离散元法模拟了料斗的卸料。因此,利用离散元法解决料门式给料器料门受力计算这一难题是很可取的,但是目前还未见有用离散元法计算料门受力的文献。为此,采用颗粒离散元法借助PFC3D离散元软件,仿真计算分析颗粒物料在料仓中对料门的作用力,确定料门开、合过程中受到颗粒物料的阻力及所需要的驱动力,从而确定选择的驱动机构是否能够满足要求。

1 料门式给料器简介

料门式给料器是通过控制料斗出料口的大小,以实现给料及给料速度大小控制的一种包装机给料机构,通常具有给料速度可以很大、结构简单、价格低廉的特点,在大规格的散料袋包装机中使用较多。由于其排料是靠物料的重力从料斗内流出,因而通常只能用于流动性较好的颗粒状物料给料。一种典型的料门式给料器见图1^[1],其可以实现粗、精等2级给料。

料门通过两侧的侧板固定在转轴上,转轴套在外壳的滑动轴承内可以转动,摆动臂通过销钉与转轴固

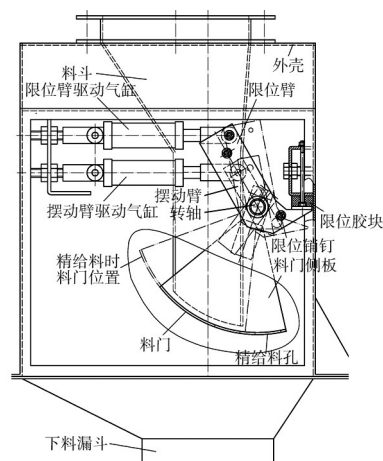


图1 典型料门式给料器结构

Fig.1 The structure of typical door-form feeder mechanism for granular material

定,这样当摆动臂在气缸驱动下摆动时,会通过转轴带动料门实现摆动,从而实现料斗出料口的打开与关闭。活套在转轴上的限位臂用来限制摆动臂停留在精给料位置,实现精给料。初始时,料门处于最下方(图1中实线所示料门),料斗下端的出料口被料门完全堵住,物料不能够流出。当需要粗给料时,限位臂驱动气缸和摆动臂气缸同时伸长,并达到最大行程,此时,料门顺时针摆动到出料口完全打开,物料从料斗下端出料口流出后经由下方的下料漏斗及包装机的其他机构流入袋中。当粗给料完成后需要精给料时,摆动臂驱动气缸收缩,带动料门逆时针摆动,当摆动臂下端接触到限位臂下端的限位销轴时停止摆动(图1中双点划线位置)。此时,料门上用于精给料的小孔正好处于出料口下方,物料可以从精给料孔流出,实现精给料。当精给料完成需要停止给料时,限位臂驱动气缸收缩,摆动臂由于限位臂的限制解除恢复逆时针摆动,最终料门又回到初始状态。可见,料门在由完全关闭到打开时,摆动臂气缸需要提供足够的推力来克服颗粒物料对料门的摩擦力,而在精给料时,限位臂气缸需要提供足够的推力来限制摆动臂的继续摆动。物料从给料器流出后,需要依靠包装机的其他部分才能完成物料的定量充填。料门式给料器在某型吨袋包装机中的应用见图2。

在图2中,包装机主要由料门式给料器、挂钩、压袋机构、称重机构等组成,给料器的下料漏斗嵌在下方的导料筒内,导料筒上套着吨袋的进料口,吨袋主要由用于称量其颗粒物料质量的称重机构支撑,使用时在给料器的上方需要配料仓,以及用于连续或间歇往料仓中加料的机构。此包装机工作时,先将袋套在

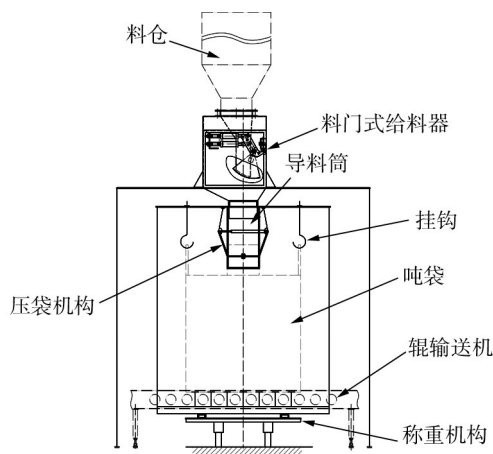
图2 某吨袋包装机结构^[13]

Fig.2 Structure diagram of a ton bag packaging machine

导料筒上并用压袋机构压紧,同时将袋的吊耳挂在挂钩上;然后给料器分别进行粗给料和精给料,完成规定物料的充填。在给料过程中,称重机构实时称量统计袋内物料的质量,并将信号反馈给控制系统;充填完成后由滚动输送机运离已充填好的袋。

2 料门受力计算

2.1 计算方法分析

料门式给料器中料门的受力与筒仓中仓底的受力类似,因此,可以用筒仓底部受力公式^[2]进行粗略估算。由于,给料器的料斗结构较复杂且有偏心,因此,如果利用文献[2,3]中给出的仓底压力公式计算料门的压力,就会产生较大误差。离散单元法是以球体为对象,反复运用牛顿第二运动定律和力-位移定律不断更新球体颗粒的位置,描述颗粒运动过程^[4],通过反复迭代计算得到结果。离散元方法允许单元间的相对运动不一定要满足位移连续和变形协调条件,尤其适合求解大位移和非线性问题^[6],因此,对于这里需要模拟颗粒物料在料斗中堆积,从而计算对料门产生的作用力非常合适。离散元法发展到现在,已有不少较成熟的软件可供选择使用,代表性的有 EDEM 和 PFC 等。这里选择主要用于颗粒和简化模型力学性态分析^[4-7]的 PFC3D (particle flow code),即颗粒流程序进行颗粒物料对料门作用力的仿真分析。在 PFC3D 中,所有的面都会简化为无厚度的墙体(wall),将实际不规则的颗粒物料简化为一定半径的球体颗粒(ball),或者是由多个球体颗粒组合成的团块(Clump),通过设定墙体和球体的参数,模拟实际结构和颗粒物料的力学特性。可

见,为了能够利用 PFC3D 进行分析,需要对实际的给料器结构进行合理的简化,以便于创建分析模型,并将实际的颗粒物料简化为一定半径范围内的球体。此外,由于 PFC 软件中对于各种力的计算和记录,均是以直角坐标系的形式进行,故需要将直接得到的 x, y, z 方向的力分解为料门的法向和切向力,以便更加形象地描述作用力的效果。利用离散元法仿真计算颗粒物料对料门的作用力的过程如下所述。

1) 对料斗、料仓及料门等模型进行简化,以便在离散元软件中创建分析模型。

2) 在 PFC3D 中创建简化后的料仓及料门模型,并设定相关参数。

3) 设置记录料门的受力和颗粒物料的不平衡力,得到充填颗粒物料后料门的受力,并由不平衡力确定颗粒物料堆积是否趋于稳定。

4) 分多批次在料仓中填充球体模型以代替颗粒物料,并设定球体模型的参数,通过求解使球体堆积平衡。

5) 提取得到的料门仿真分析数据,将直接得到的受力分解为法向和切向受力。

2.2 模型创建与参数设定

在设计给料器时通常不设计料仓,而是在使用时选配,在分析料门受力时必须考虑料仓内储存的物料对料门的影响,因此这里参考文献[13]中料仓的尺寸。料门、料斗及料仓的模型简化见图3。由于料门式给料器中料门受颗粒物料的作用力主要与颗粒物料、料门、料斗及料仓有关,因此,在分析时不考虑驱动机构、料门转轴等附属机构(图3a)。此外,颗粒物料对料门的有效作用面积为料斗下端出料口正对的料门部分,因此,将弧形料门简化为与料斗出料口大小相同的倾斜放置的平板,同时对一些零件的连接细节在不影响结果的前提下简化掉(图3b)。以简化后的模型内尺寸为基准,在 PFC3D 中创建尺寸相同的分析模型(图3c)。

在 PFC3D 中创建好料门、料斗及料仓模型并设定好参数后,需要往料仓内多批次填充一定半径的若干球体颗粒来模拟实际中的颗粒物料,并求解达到堆积平衡(图3c)。分批次填充是为了便于观察统计在不同质量的颗粒物料及料位高度时料门的受力大小。球体颗粒填充采用自动生成的方法,即设定生成球体数目、半径范围及空间范围后,系统会自动在设定范围内随机均匀生成规定数量的球体,其中,球体的半径在设定的半径范围按高斯分布。由于刚

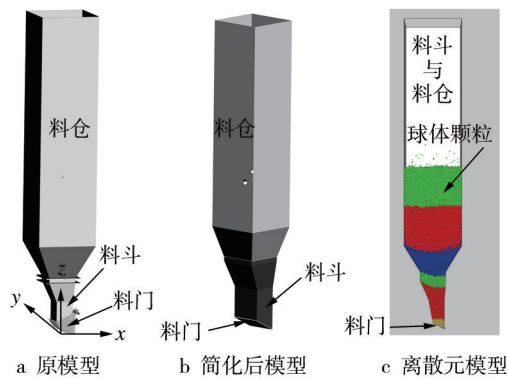


图3 料门、料斗及料仓的模型简化

Fig.3 The structure simplification of material door, hopper and silo

生成的球体颗粒在空间松散分布,因此需要循环求解使其自由下落达到堆积平衡,从而得到物料在料斗及料仓中堆积的料门作用力。此外,为了提高求解速度,保证计算精度,在靠近料门颗粒的半径相对较小,往上依次逐渐增大。由于实际中料仓多为钢材,因此墙体参数以普通钢为参照,设置法向刚度为20 kN/m^[14-15],切向刚度为900 kN/m、摩擦因数为0.3^[11]。球体采用干颗粒无阻尼模型,参数以小麦为参照,设置颗粒法向刚度为30 kN/m^[14-15]、切向刚度为30 kN/m^[14-15]、摩擦因数为0.466^[3,11]、密度为800 kg/m³^[3,11]、重力加速度为9.81 m/s²。每次填充的球体颗粒数目、半径及重量见表1。

表1 球体填充次数、数量及对应参数

Tab.1 The number, amount and corresponding parameters of the filled balls

批次	半径/mm	填充数目 ($\times 10^3$)/个	单次填充 总重量/N	累积填充总 重量/N
1	3~3.5	8	9.1	9.1
2	6~7	7	63.6	72.7
3	6~7	5	455	118.2
4	6~7	20	181.5	299.7
5	6~10	50	892.3	1192
6	6~10	40	713	1762.4

3 料门受力结果分析

3.1 离散元仿真结果分析

由于只有重力作用,且整个料门、料斗及料仓在y方向对称,因此,料门在y方向上受力近似为0。在完成6次颗粒物料充填并求解达到堆积平衡后,可提取

记录料门在x和z方向的受力数据,分析得到料门在各次颗粒物料充填后的受力情况,见表2。

表2 料门x和z方向受力情况

Tab.2 The force of material door in x and z direction N

批次	z	x	批次	z	x
1	-8.8	-4.1	4	-52.8	-17.0
2	-41.5	-15.2	5	-59.5	-18.2
3	-46.6	-16	6	-60.6	-18.5

表2中的负号表示料门受力方向为x和z的负方向。若以累积填充的球体颗粒重量为横坐标,以料门在x和z方向的受力为纵坐标,可得到料门在x和z方向受力与料斗内颗粒物料重量之间的关系,见图4。

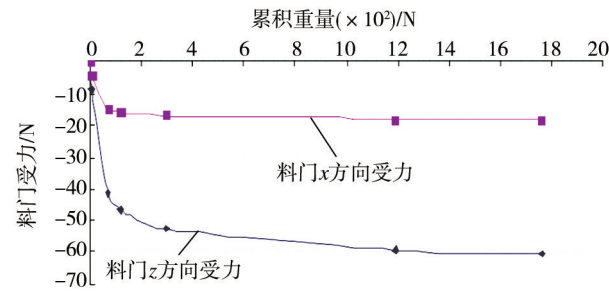


图4 料门受力与料斗内颗粒物料重量的关系

Fig.4 The relationship between the force on the material door and the weight of granular material inside the silo

由图4可知,在料仓内物料较少时,料门的受力与料仓内颗粒物料的重量近似成线性关系,但当料仓内物料增加到一定程度后,料门受力与料仓内物料的增加不再成线性关系,最后料门的受力趋于稳定值。在整个过程中,料门在竖直方向上受到物料的作用力始终小于袋中颗粒物料的重量,且随着物料量的增加变得更为明显。根据已知的料斗、料仓尺寸,可由得到的离散元分析模型图象,利用等比例关系得到各次颗粒物料充填完成后颗粒物料的高度。得到的各次颗粒物料填充并堆积平衡后料仓内料位的高度见图5。

在图5中,料仓锥形过渡起始处的尺寸为617 mm,从而由等比例得到第1次、第2次球体颗粒填充并堆积平衡后的料位高度分别为109, 447 mm,等等。若以料位高度为横坐标,以各次填充后料门的受力为纵坐标,则得到料门受力随料位高度的变化见图6。

由图6可知,料位在447 mm以下,即在料斗下端

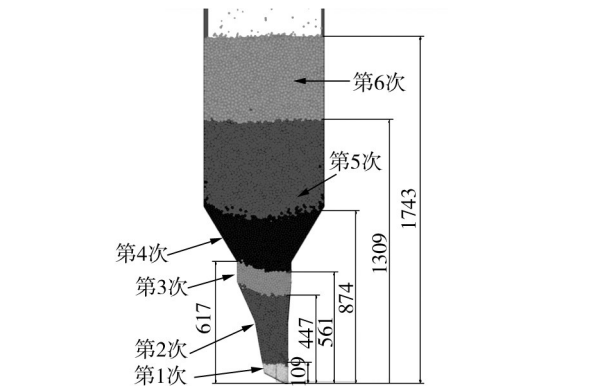


图5 料位高度变化
Fig.5 Variation in height of granular material

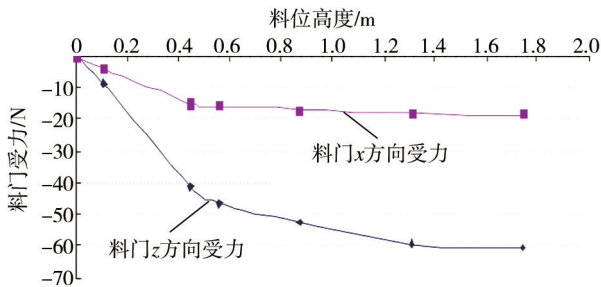


图6 料门受力与料位高度关系
Fig.6 The relationship between the force on the material door and the height of granular material

直筒范围内,料门的受力随着料位高度的增加而增加,并近似呈线性变化。此后由于料斗结构的变化,料门受力随着料位高度增加的变化速度降低。当料位高度达到1300 mm以后,也即料位高度是料斗直筒尺寸的约6倍以后,随着料位高度增加,料门受力趋于稳定值61 N。研究还发现,当颗粒物料密度增大时,料门受力也成比例增大,但是料门受力随料位高度的变化趋势不变。

3.2 料门受力分解

由于实际中料门表现为法向受压和切向受静摩擦力,故为了计算料门开合的阻力,需要将料门在x和z方向的受力分解为沿法向和切线方向的受力。取料门zOx截面进行研究,将受力简化为料门中心的1点上,则可得料门受力分解见图7。

在图7中, F_z 、 F_x 分别为料门在z方向和x方向上的受力,由前面的分析可知, F_z 、 F_x 均为负值,因而 F_x 水平向左, F_z 垂直向下。将 F_x 分解为切向和法向力(F_{xs} 和 F_{xm}),将 F_z 分解为切向和法向力(F_{zs} 和 F_{zm}),其方向见图7。其中, $F_{xs}=F_x\cos\alpha$, $F_{xm}=F_x\sin\alpha$, $F_{zs}=F_z\sin\alpha$, $F_{zm}=F_z\cos\alpha$, α 为料门与水平方向的夹角,等于 $26^\circ 22' 30''$ 。则料门在切向和法向受到的合力为 $F_s=F_{zs}-F_{xs}$, $F_n=F_{zm}+F_{xm}$ 。代入6次不同颗粒物料量对应的料门受力 F_x 和 F_z ,则得到料门在法向和切向的合力见表3。

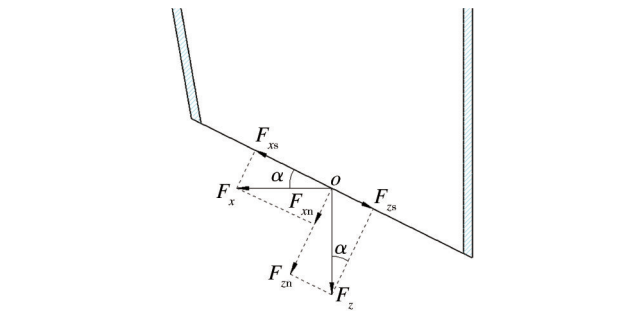


图7 料门受力分解
Fig.7 The decomposition of the force on the material door

$F_z\cos\alpha$, α 为料门与水平方向的夹角,等于 $26^\circ 22' 30''$ 。则料门在切向和法向受到的合力为 $F_s=F_{zs}-F_{xs}$, $F_n=F_{zm}+F_{xm}$ 。代入6次不同颗粒物料量对应的料门受力 F_x 和 F_z ,则得到料门在法向和切向的合力见表3。

表3 料门在切向和法向的等效受力
Tab.3 The equivalent tangential and normal force of the material door

批次		F_s	F_n	批次		F_s	F_n
1		-0.2	-9.8	4		-8.2	-54.9
2		-4.8	-44	5		-10.1	-61.4
3		-6.4	-48.9	6		-10.4	-62.5

表3中 F_s 为负值表示料门受到的切向作用力为沿切面向下, F_n 为负值表示料门受到的法向作用力为垂直料门向下,即为料门法向受压。由表3可知,料门在法向受到的压力明显大于切向受到的作用力,但是,随着颗粒物料的增多,它们的相对差值在减小。若以料仓中颗粒物料的料位高度为横坐标,以料门分别在法向和切向受到的合力为纵坐标,则可得到料门受力与料仓内颗粒物料料位高度的关系,见图8。

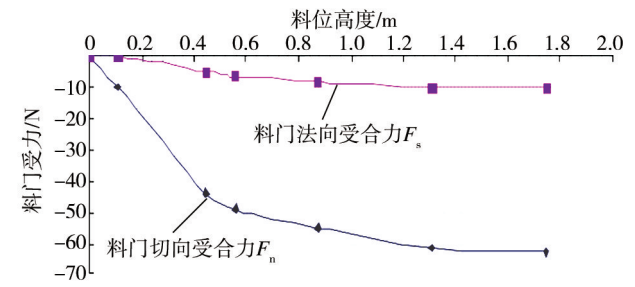


图8 料门在法向和切向受力变化
Fig.8 The changes in the force on the material door in normal and tangential directions

由图8可知,与料门在水平和垂直方向的受力类

位销轴接触时停止摆动,从而靠料门的精给料孔实现精给料。可见,若想维持精给料位置,则限位臂必须能够可靠限制摆动臂的摆动。如果忽略各力臂的变化,则精给料时各杆之间的位置关系与料门完全关闭时相同,仍可以用图9b表示。此时,料门摆动臂驱动气缸收缩作用力 F_B 向左, F_C 垂直 BC 向下, F_E 向右。由力平衡可得 $F_d l_1 + F_B h_1 = F_E h_2$,则 $F_E = (F_d l_1 + F_B h_1) / h_2$ 。

假设在精给料时料门受到的压力仍然为125 N,则由于颗粒物料的流出会在料门上表面滑动而产生摩擦力 $F_f = 37.5$ N。将 $F_B = 844$ N, $l_1 = 230$ mm, $F_f = 37.5$ N, $h_1 = 75$ mm代入可得,限位气缸维持精给料位置所需推力为 $F_E = 553.3$ N。而实际中选择的限位臂驱动气缸也为 $\phi 40$ mm,在额定气压下能够提供的推力为1000 N,拉力为844 N。可见,限位臂驱动气缸的驱动力足够,完全能够满足需要。

5 结语

首次利用离散元法仿真分析计算得到了料门式给料器工作中,料门完全关闭时受颗粒物料作用力的大小及变化。结果显示:随着料斗内颗粒物料重量和高度的增加,料门受到的作用力最初近似呈线性逐渐增大,但当料位高度增大到一定程度以后,料门受到的作用力不再增大而趋于稳定值,而且这个高度基本不受颗粒物料密度的影响。但是料门受力变化与料斗结构有关。将离散元仿真分析得到的料门受力进行适当修正后,确定了给料器料门完全关闭时受到的最大压力和静摩擦力。将料门及其驱动机构进行简化后,对其受力进行了分析,确定了在关闭状态时打开所需的驱动力,以及在精给料时限位臂驱动气缸所需的驱动力。分析结果显示,实际选择的气缸提供的驱动力足够。该分析方法还可以用在其他类似机构中,从而可以在设计阶段确定一些重要过程所需的驱动力,便于选择合理的执行机构或进行机构优化。

参考文献:

- [1] 李振亮,姚清华,李亚,等.自动定量称重力给料机构及有关参数的选择[J].轻工机械,2008,26(1):103—105.
LI Zhen-liang, YAO Qing-hua, LI Ya, et al. The Feeding Mechanism Depend on Gravity of Automatic Quantitative Scale and It's Related Parameters Chose[J]. Journal of Light Industry Machinery, 2008, 26(1): 103—105.
- [2] Γ.K 克利因.散体结构力学[M].陈大鹏,王荣璜,等译.北京:人民铁道出版社,1960.
KLEIH Γ K. Structural Mechanics of Granular Material[M]. Chen Da-peng, Wang Rong-yun, et al. Translated. Beijing: China Railway Publishing House, 1960.
- [3] 黄松元.散体力学[M].北京:机械工业出版社,1993.
HUANG Song-yuan. Mechanics of Granular Material[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [4] 魏群.散体单元法的基本原理数值方法及程序[M].北京:科学出版社,1991.
WEI Qun. The Basic Principles, Numerical Methods and Procedures of Discrete Element Method[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [5] 徐泳,黄文彬.颗粒离散元法建模和仿真的若干进展[J].过程工程学报(增刊),2002:530—535.
XU Yong, HUANG Wen-bin. Some Progress of Discrete Element Modeling and Simulation Method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering(Suppl), 2002: 530—535.
- [6] 刘凯欣,高凌天.离散元法研究的评述[J].力学进展,2003,33(4):483—489.
LIU Kai-xin, GAO Ling-tian. Review of Discrete Element Method Study[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 483—489.
- [7] 徐泳,孙其诚,张凌,等.颗粒离散元法研究进展[J].力学进展,2003,33(2):215—257.
XU Yong, SUN Qi-cheng, ZHANG Ling, et al. Advances in Particle Discrete Element Method[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 215—257.
- [8] LI Yan-jie, XU Yong, THORNTON C. A Comparison of Discrete Element Simulations and Experiments for 'Sandpiles' Composed of Spherical Particles [J]. Powder Technology, 2005, 160: 219—228.
- [9] ZHOU Y C, XU B H, YU A B, et al. An Experimental and Numerical Study of the Angle of Repose of Coarse Spheres[J]. Powder Technology, 2002, 125: 45—54.
- [10] DJORDJEVIC N. Discrete Element Modeling of the Influence of Lifters on Power Draw of Tumbling Mills[J]. Minerals Engineering, 2003(16): 331—336.
- [11] 杜明芳,张昭,周健.筒仓压力及其流态的颗粒流数值模拟[J].特种结构. 2004, 21(4): 39—41.
DU Ming-fang, ZHANG Zhao, ZHOU Jian. Numerical Simulation of Particle Flow and the Pressure of Silo[J]. Special Structures, 2004, 21(4): 39—41.
- [12] 徐泳, KAFUI K D, THOMTON C. 用颗粒离散元法模拟料仓卸料过程[J].农业工程学报, 1999, 15(3): 65—69.
XU Yong, KAFUI K D, THOMTON C. Using Discrete Element Method to Simulate the Process of Silo Unloaded[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 65—69.
- [13] 苏俊明,李振亮,李亚,等.吨袋包装机料仓额定容量设计计算方法研究[J].包装工程. 2014, 35(7): 95—100.
SU Jun-ming, LI Zhen-liang, LI Ya, et al. Calculation Method of Rated Capacity of Silo in Tonnage Bagging Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 95—100.

- by FEM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(10): 62—64.
- [6] 魏延刚. 圆柱滚子轴承滚动体新的修形曲线[J]. 机械设计与制造, 2003(2): 81—83.
- WEI Yan-gang. A New Crowned Roller of Cylindrical Roller Bearings[J]. Machinery Design & Manufacture, 2003(2): 81—83.
- [7] MURTHYCSC, RAO A R. Mechanics and Behaviour of Hollow Cylindrical Members in Rolling Contact[J]. Wear, 1983, 87: 287—296.
- [8] WU Ji-mei, LEI Wen-jiao. Transverse Vibration Characteristics and Stabilization of a Moving Membrane with Elastic Supports[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2014, 33(1): 65—77.
- [9] WU Ji-mei, WANG Zhong-min, WU Qiu-min, et al. Transverse Vibration Characteristics of a Paper Web with Multi-Roller Supports[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2009, 28(2): 133—144.
- [10] 李忠杰, 王树宗, 练用庆. 发动机圆柱滚子轴承载荷分析及刚度计算[J]. 轴承, 2007(1): 1—3.
- LI Zhong-jie, WANG Shu-zong, LIAN Yong-qing. Load Analysis and Rigidity Calculation of Cylindrical Roller Bearings[J]. Roller, 2007(1): 1—3.
- [11] 刘静, 邵毅敏. 基于非理想 Hertz 线接触特性的圆柱滚子轴承局部故障动力学建模[J]. 机械工程学报, 2013, 50(1): 91—97.
- LIU Jing, SHAO Yi-min. Dynamic Modeling on Localized Defect of Cylindrical Roller Bearing Based on Non-Hertz Line Contact Characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 50(1): 91—97.
- [12] 岳进, 王自勤. 凸轮滚子轴承疲劳寿命及滚子接触应力计算[J]. 制造业自动化, 2014, 36(9): 71—74.
- YUE Jin, WANG Zi-qin. The Calculation of Roller Fatigue Life and Contact Stress of Cam Roller Bearing[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(9): 71—74.
- [13] 毛文武, 邬国军. 基于 SolidWorks 的滚动轴承三维参数化图库开发[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 143—145.
- MAO Wen-wu, WU Guo-jun. Development of 3D-Parameterized Drawing Library of Rolling Bearings Based on SolidWorks [J]. Packing Engineering, 2008, 29(12): 143—145.
- [14] 杨金华. 食品包装机中组合机构的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2005(12): 172—174.
- YANG Jin-hua. Optimization Design of The Combined Mechanism in Food Packages[J]. Machinery Design and Manufacture, 2005(12): 172—174.
- [15] 马成习. 基于 Pro/E 的包机槽轮机构建模及运动仿真[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 36—37.
- MA Cheng-xi. Charter Flight Slot Wheel Mechanism Modeling and Movement Simulation Based on Pro/E[J]. Packing Engineering, 2008, 29(2): 36—37.

(上接第 44 页)

- ods for Rated Capacity Design of Hopper in Ton Bag Packing Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 95—100.
- [14] GB 50077—2003 钢筋混凝土筒仓设计规范[S].
- GB 50077—2003 Reinforced Concrete Silo Design Specifications[S].
- [15] 原方, 张松松. 大直径浅圆仓偏心卸料的颗粒流模拟[C]// 河南省力学学会. 力学与工程应用(第 13 卷). 2010: 69—73.
- YUAN Fang, ZHANG Song-song. Large-diameter Eccentric Unloading Squat Silos Particle Flow Simulation[C]// Mechanics Institute of Henan Province. Mechanics and Engineering Applications (Vol 13), 2010: 69—73.
- [16] 田晓红, 李光涛. 粮食孔隙率测定方法探讨[J]. 粮食加工, 2009, 34(5): 35—37.
- TIAN Xiao-hong, LI Guang-tao. The Method of Measuring the Porosity of Grain[J]. Food Processing, 2009, 34(5): 35—37.
- [17] 苏俊明, 李振亮, 李亚, 等. 称重式包装机系统延时和空中料柱的预测补偿方法[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 85—92.
- SU Jun-ming, LI Zhen-liang, LI Ya, et al. Predictive Compensation Method of System Delay and Materials Stayed in the Air of Weighing Packaging Machine [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 85—92.
- [18] YU Y W, SAXEN H. Discrete Element Method Simulation of Properties of a 3D Conical Hopper with Mono-sized Spheres [J]. Advanced Powder Technology, 2011(22): 324—331.