

黑索今粉料安全、连续加料与计量装置

汪庆华¹, 邓国栋¹, 李大勇²

(1. 南京理工大学 国家特种超细粉体工程技术研究中心, 江苏 南京 210094; 2. 辽宁庆阳特种化工有限公司, 辽宁 辽阳 100821)

摘要:为了解决黑索今粉料因流动性差而容易在料斗卸料口结拱,造成卸料口堵塞,使黑索今粉料连续化、自动化加料中断,影响计量精确性和安全性的问题,设计一种黑索今粉料安全、连续加料计量装置,利用粉体流动测试仪测试黑索今粉料的流动性参数。结果表明:该装置的合适料仓参数为料仓半顶角小于 28.9°,料仓出料口直径大于 168 mm;在利用该装置加料的过程中,黑索今粉料能均匀、稳定地从料仓流出,计量误差小于 1.0%。

关键词:黑索今粉料;加料;计量;粉体流动性

中图分类号:TQ560.5 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2015)04-0095-04

Research on Safely and Continuously Feeding and Metering Device of RDX Powders

WANG Qinghua¹, DENG Guodong¹, LI Dayong²

(1. National Special Superfine Powder Engineering Research Centre of China, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Qingyang Chemical Industry Corporation, Liaoyang 100821, China)

Abstract: To solve the problem that continuously and automatically feeding of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX) powders was interrupted and imprecision as well as security of metering were affected by RDX powders with poor flowability and easily blocked in the bin, a safe and continuous feeding and metering device for RDX powders was designed. Flowability parameters of RDX powders were tested by a powder flow tester. The results show that the appropriate hopper parameters are that the half angle of hopper is less than 28.9° and the diameter of hopper outlet is larger than 168 mm. RDX powders can run out from the hopper stably and uniformly in the process of feeding by the device, and the measurement error is less than 1.0%.

Keywords: hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine powder; feeding; metering; flowability of powder

收稿日期:2014-10-22,修回日期:2014-11-10。

基金项目:国防火炸药科研专项项目,编号:AS03144。

第一作者简介:汪庆华(1989—),男,硕士研究生,研究方向为含能材料精确计量加料技术。E-mail:654944915@qq.com。

通信作者简介:邓国栋(1965—),男,高级工程师,研究方向为含能材料工艺技术。E-mail:dypdgd@126.com。

黑索金(RDX)是一种稳定性好、能量高、能量密度大的烈性炸药,是改性双基火药的主要组分之一^[1]。由于改性双基火药的性能与黑索金的含量有关,在制备改性双基火药时必须保证黑索金粉料的准确配比,因此要使改性双基火药的性能达到最佳,需要准确地计量黑索金粉料。目前国内采用人工方式对黑索金粉料直接进行计量、加料,不仅无法保证火药生产的连续性,而且存在如下问题:黑索金属于强易燃易爆材料,在加料过程中极易因摩擦、冲击和静电而引起爆炸^[2],对人类的生命和财产安全造成巨大危害;火药生产过程中黑索金输送加料不能实现人机隔离,生产危险性大,生产效率低,产品质量得不到保证^[3];由于黑索金粉料的粒径级别为微米级,颗粒间的附着、凝聚力等作用很容易使黑索金粉料发生团聚作用,因此在加料过程中经常会出现结拱,堵塞料仓,导致粉料不能连续、均匀地向下加料,造成“架桥断料”,使得产品成分不均匀^[4-5]。另外,如果出料口堵塞时停止加料,采用人工敲击或捣孔的方法来疏通出料口,不但影响生产效率,而且存在安全隐患^[6-7]。

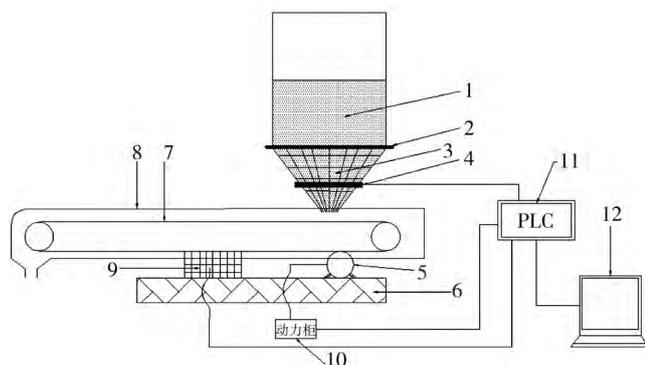
为了使改性双基火药达到最佳性能,并且促进火药生产向连续化、自动化、安全化方向发展,本文中设计一种对黑索金这种特殊粉料进行加料计量的装置即防静电电子皮带秤,利用粉体流动测试仪测试黑索今粉料的流动性参数。

1 防静电电子皮带秤装置设计

1.1 结构组成

黑索今安全输送与连续计量所采用的防静电电子皮带秤装置结构示意图如图 1 所示。

针对黑索金计量加料的危险性,输送机料仓材料采用软、硬结合,料仓上部的硬料仓采用金属不锈钢材料,料仓下部为软料仓,硬料仓与软料仓靠法兰相连接,软料仓内部设有防静电布袋,防静电布袋套于连接法兰之上,软料仓下部装有气动阀门,防静电皮带采用防静电塑料制成,防静电皮带由防爆电机带动运转,同时防静电皮带由防尘外罩包围,动力柜控制防爆电机的转速,高精度称重传感器装在底座上,气



1—料仓上部; 2—连接法兰; 3—料仓下部; 4—气动阀门;
5—防爆电机; 6—底座; 7—防静电皮带; 8—防尘外罩;
9—高精度称重传感器; 10—动力柜;
11—可编程控制器; 12—远程控制计算机。

图 1 防静电电子皮带秤结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anti-static electronic belt scale

动阀门、高精度称重传感器,动力柜均与可编程控制器(PLC)^[8]相连,PLC 最后接入远程控制计算机。

加料计量装置的落料方式为自然落料,与搅动落料和吹气落料方式相比,具有结构简单,噪音小,不会促使粉尘飞扬,而且可以防止产生静电等优点,对于黑索今这种特殊物料而言,自然落料方式是一种安全、有效的落料方式;使用防静电皮带传送黑索今粉料,皮带采用防静电材料制成,能避免静电积累;黑索今粉料从料仓中直接落到防静电皮带上被输送走,与螺旋式输送相比,结构更简单,效率和安全性能更高,而且螺旋式输送中可能会出现螺杆的刚性挤压,这会使黑索今粉料因受摩擦和挤压而引爆;防爆电机在运行时不会产生火花,也能阻止黑索今粉料进入电机外壳内发生爆炸危险;整个加料与计量过程通过远程计算机控制,人机隔离,有效保护操作人员人身安全。

1.2 计量原理

防静电电子皮带秤装置采用的是失重法计量原理,黑索今粉料输送加料时,开启防静电皮带(设定合适速度),然后打开气动阀门,黑索今粉料通过软料仓撒落到运动的防静电皮带上,料仓内黑索今粉料质量在单位时间 Δt 内的减少值为 Δm ,PLC 通过高精度称重传感器不停地对黑索今粉料进行质量信号采集, Δm 即为皮带的瞬时加料量,则皮带的瞬时加料速度 $v = \Delta m / \Delta t$,然后利用计算器对各瞬时加料速度进行积分,获得一段时间内加料的累计总质量 m :

$$m = \int_0^t \frac{\Delta m}{\Delta t} dt = \int_0^t v dt。$$

黑索今粉料经防静电皮带输送至吸收槽中,完成计量加料过程。黑索今粉料在线计量结果可直接显示于远程计算机上。

1.3 料仓设计

实验原料为 α 型黑索今粉料,山西省太原 245 厂生产,质量为 0.5~1 kg,粒径为 20~70 μm ,颗粒形状为球形,含水质量分数为 10%;实验仪器为 PFT 型粉体流动测试仪,美国 Brookfield 公司生产。实验设备为防静电电子皮带秤,圆锥形料仓半顶角为 25° ,料仓出料口直径为 175 mm。

黑索今是一种重要的单质炸药,白色粉状结晶,通常有 α 型和 β 型 2 种晶型。由于 α 型黑索今的稳定性强于 β 型黑索今的,因此军民领域常用的是 α 型黑索今。黑索今颗粒可以呈现出球形、片状、立方体状、花生壳状、长方体状等不同形状,熔点为 $204.5\sim 205^\circ\text{C}$,熔化时分解,晶体密度为 1.816 g/cm^3 ,黑索今的撞击和摩擦等机械感度较大,爆热为 $6\ 025\text{ kJ/kg}$,在火炸药生产时,首先进行原材料的准备,黑索今作为固体含能组分的一种主要成分先从料仓中排出,同时实现精确计量,然后输送到混料槽中与其他含能组分进行混合。由于黑索今粉料本身具有危险性高和流散性差等问题,因此料仓设计不合理,将会导致粉料堵塞料仓,不能连续、均匀地向下供料,不但会影响计量的连续性和准确性,而且人工疏通料仓会产生安全隐患。由此可知,在此防静电电子皮带秤中,设计出合理的料仓是解决黑索今粉料加料计量问题的关键。

料仓的流型通常有 2 种^[9],即中心流型料仓(又称漏斗型料仓)以及质量流型料仓(又称整流仓)。中心流型料仓内,粉体流动顺序混乱,部分粉体附着在料仓侧壁上形成“鼠孔”(如图 2 所示),造成先加入的粉料后流出,出料不均匀;而质量流型料仓卸料速率稳定,不会出现部分物料滞留在料仓内的情况,卸料密度均匀,卸料时物料同时向卸料口流动,物料先进入料仓也会先流出,整个粉体层可以大致均匀地下降、流出^[10]。由此可知,质量流型料仓是黑索今加料的理想型料仓。

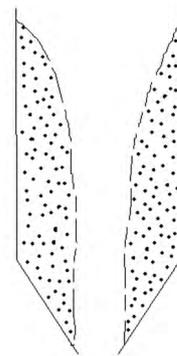


图 2 “鼠孔”示意图

Fig. 2 Scheme of “rat-hole”

为了使黑索今粉料在料仓中形成质量流并且顺畅无阻地流出,需要对出料口直径和料仓的半顶角进行计算,出仓卸料口直径太小,会导致“架桥断料”(如

图 3 所示),同时,料仓锥形面与中心轴线的夹角即料仓半顶角 θ (如图 4 所示)应小于某个临界值,料仓出料口直径 d (如图 4 所示)应大于粉体在料仓出口处形成拱架的最大直径即粉体的拱架尺寸 d_a ,否则也会发生“架桥断料”现象^[11-12]。

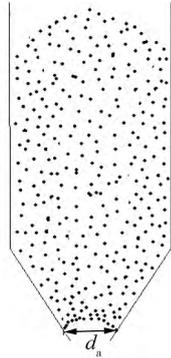


图 3 物料结拱示意图

Fig. 3 Scheme of arching of materials

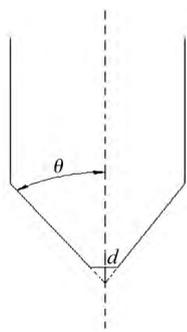


图 4 料仓结构示意图

Fig. 4 Scheme of silo structure

料仓的设计需要根据粉体的流动性来确定^[13],在生产中人们往往简单地通过测定粉体的休止角来确定加料斗的倾斜角,人为操作因素和环境的不同会对安息角的测定产生较大的误差,而且休止角体现的也仅仅只是粉体颗粒之间的相对运动自由程度,即颗粒之间相互摩擦作用的外观表现,只考虑了影响粉体流动性的一方面,实际上影响粉体流动性的因素是多方面的,比如粉体与壁面的摩擦、粉体的密度或孔隙率等都会对粉体的流动性产生影响,因此利用休止角确定料斗倾斜角具有一定的局限性^[14-15]。本文中采用 PFT 型粉体流动测试仪来测定黑索金粉料的流动性,PFT 型粉体流动测试仪按美国材料与试验协会 (ASTM) Jenike 剪切单元对粉体进行剪切测试标准测试方法 D6128 标准设计,该仪器采用 Jenike 法^[16-18]测定粉体流动性能,综合考虑了影响粉体流动性的各种因素,可以测定物料的各种流动性参数,这些参数不仅可以反映粉体的流动特性,而且可以利用这些参数设计出更加符合实际的工况条件的加料料仓。经上述

方法测得黑索金粉体流动性参数如下:稳态流动时的动摩擦角即有效内摩擦角 φ 为 55.3° ,壁面能使粉体滑移必须倾斜的角度即壁面摩擦角 δ 为 38.4° ,粉末松散填充时单位体积的质量即松装密度 ρ_b 为 $1\ 115.5\ \text{kg/m}^3$,拱架发生坍塌时粉体拱架表面的密实强度即临界开放屈服强度 $\bar{\sigma}_c$ 为 $0.920\ \text{kPa}$ 。

圆锥形料仓半顶角由下式^[19]确定:

$$\theta_{\max} = \frac{90 + \varphi - \delta - \arcsin(\sin \delta / \sin \varphi)}{2}, \quad (1)$$

将 $\varphi=55.3^\circ$ 、 $\delta=38.4^\circ$ 代入式 (1), 计算得到 $\theta_{\max}=28.9^\circ$, 因此实际料仓半顶角 $\theta < 28.9^\circ$ 。

不产生拱架的最小料仓出料口直径 d 应大于粉料拱架尺寸 d_a , 拱架尺寸由下式^[19]确定:

$$d > d_a = \frac{2\ 000 \bar{\sigma}_c}{\rho_b g}, \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度, kg/s^2 。

将 $\bar{\sigma}_c=0.920\ \text{kPa}$, $\rho_b=1\ 115.5\ \text{kg/m}^3$ 代入式 (2), 计算得 $d > d_a=168\ \text{mm}$ 。

综上所述,当实际料仓半顶角 $\theta < 28.9^\circ$, 料仓出料口直径 $d > d_a=168\ \text{mm}$ 时,才能满足黑索金粉料加料需要,以防出现架桥现象。

2 结果与讨论

为了进一步验证此黑索今粉料安全、连续加料计量装置的稳定性与精确性,对黑索金粉料进行加料速度恒定及改变加料速度情况下的计量实验。

2.1 加料速度恒定时的计量实验

首先验证在加料速度恒定时防静电电子皮带秤的稳定性和精确性。分别称取质量为 60.0、90.6、120、150.4 kg 共 4 批的黑索金粉料,利用防静电电子皮带秤分别进行计量实验。将黑索金粉料倒入防静电电子皮带秤料仓中,启动防静电电子皮带秤,设置加料速率为 $318.6\ \text{kg/h}$,开启气动阀门,分别记录各批次数据并分别计算仪器显示累计总质量 m 与实际质量 m_0 之间的误差 ω ,

$$\omega = \frac{m_0 - m}{m} \times 100\ %.$$

计量的结果如表 1 所示。可以看出,4 个批次的黑

表 1 加料速度恒定时的计量结果

Tab. 1 Metering results at a certain feeding speed

| 加料速率/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 实际质量/kg | 计量质量/kg | 计量误差/% |
|--|---------|---------|--------|
| 318.6 | 60.0 | 59.665 | 0.56 |
| 318.6 | 90.6 | 90.000 | 0.66 |
| 318.6 | 120.0 | 119.424 | 0.48 |
| 318.6 | 150.4 | 149.999 | 0.27 |

索金粉料仪器显示质量比实际质量分别偏小 0.335、0.60、0.576、0.401 kg, 平均误差为 0.49%, 误差可以控制在 1.0% 以内。此外, 观察发现, 在加料计量的过程中, 料仓内黑索金粉料均匀、稳定地从卸料口流出, 没有发生堵料现象。

2.2 改变加料速度时的计量实验

对防静电电子皮带秤在不同加料速度时的稳定性和精确性进行验证。利用电子秤分别称取 4 批质量均为 16.0 kg 的黑索金粉料, 在设置加料速率分别为 24、74、150、270 kg/h 时进行加料与计量, 结果如表 2 所示。可以看出, 在 4 批黑索金粉料的计量实验中, 皮带秤显示质量比实际质量分别偏小 0.102、0.044、0.086、0.110 kg, 平均误差为 0.53%, 均小于 1.0%。同样在加料计量的过程中, 料仓内黑索金粉料均匀、稳定地从卸料口流出, 没有发生堵料现象。

表 2 改变加料速度时的计量结果

Tab. 2 Metering results at various feed speed

| 加料速率/(kg·h ⁻¹) | 实际质量/kg | 计量质量/kg | 计量误差/% |
|----------------------------|---------|---------|--------|
| 24 | 16.0 | 15.898 | 0.63 |
| 74 | 16.0 | 15.956 | 0.27 |
| 150 | 16.0 | 15.914 | 0.53 |
| 270 | 16.0 | 15.890 | 0.68 |

3 结论

1) 黑索今粉料安全、连续加料计量装置的加料仓根据黑索金粉料流动性设计, 采用整体流料仓, 当圆锥形料仓半顶角小于 28.9°, 料仓出料口直径大于 168 mm 时, 加料时所有粉料均向料仓出料口流动, 不存在流动“死区”, 也不存在“架桥断料”及“鼠孔”, 料位均匀下降, 粉料流动稳定、均匀。

2) 采用该黑索今粉料安全、连续加料计量装置对黑索金粉料进行在线计量, 可以使计量误差保持在小于 1.0% 的范围内, 能够适应火药生产工艺连续化、自动化的需要。

3) 黑索今粉料安全、连续加料计量装置采用远程计算机进行实时监控、远程控制、人机隔离操作, 大大提高了火药生产的安全性和产品质量。

参考文献 (References):

- [1] 王元元, 刘玉存, 王建华, 等. 降感 RDX 的制备及晶形控制[J]. 火炸药学报, 2009, 32(2): 44-47.
- [2] LIU Jie, LI Qing, ZENG Jiangbao, et al. Mechanical pulverization for the production of sensitivity reduced nano-RDX[J]. 爆破器材, 2013, 42(3): 1-6.
- [3] 邓国栋, 刘宏英, 郭效德, 等. 黑索今粉料连续计量加料技术研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 23-26.
- [4] LU Haifeng, GUO Xiaolei. Study of the flowability of pulverized coals[J]. Energy Fuels, 2009, 23: 5529-5535.
- [5] 史卫东, 张良, 郭建广, 等. 石墨微粉的流动性及其影响因素[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(3): 15-18.
- [6] RAMÍREZ-GÓMEZ A, GARCÍA-TORRENT J, TASCÓN A. Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1/2/3): 920-927.
- [7] GARCÍA-TORRENT J, RAMÍREZ-GÓMEZ A, QUEROL-ARAGÓ NE, et al. Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213/214: 230-235.
- [8] 王刚峰, 郝继飞. 一种新型自动连续计量系统的设计[J]. 测量与设备, 2005(11): 33-34.
- [9] 李诚, 张秀坤. 粉体料仓的设计[J]. 设备与防腐, 2002, 30(1): 64-67.
- [10] CLAYTON J. Reviewing current practice in powder testing[J]. Organic Process Research and Development, 2015, 19(1): 102-109.
- [11] GUO J, ROBERTS A W, PRIGGE J D. Experimental investigation of wall pressure and arching behavior under surcharge pressure in mass-ow hoppers[J]. Powder Technology, 2014, 258: 272-284.
- [12] MICCIO F, BARLETTA D, POLETTO M. Flow properties and arching behavior of biomass particulate solids[J]. Powder Technology, 2013, 235: 312-321.
- [13] KETTERHAGEN W R, CURTIS J S, WASSGREN C R, et al. Predicting the ow mode from hoppers using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2009, 195: 1-10.
- [14] 田晓红, 谭斌. 漏斗法粮食休止角测量结果的影响因素研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(10): 108-112.
- [15] 崔灵, 笹边修司, 清水健司, 等. 粉体流动性及喷流性测量方法及其应用[J]. 中国粉体技术, 2012, 18(1): 72-77.
- [16] 廖荣福, 邱生祥, 潘仁湖. Jenike 型剪切测试仪在颗粒物料流动性测试中的应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2011(6): 23-28.
- [17] JENIKE A W. Gravity flow of bulk solids[M]. USA: University of Utah, 1961.
- [18] 奚新国, 张耀金. 粉体流动性能的测试研究[J]. 盐城工学院学报, 2003, 16(1): 4-7.
- [19] ARNOLD P C, McLEAN A G, ROBERTS A W. Bulk solids: storage, flow and handling[M]. Newcastle: TUNRA Ltd., 1982.