

# 非球形颗粒的栓塞状气力输送 及自动成栓机理的实验研究

谷笕华 马家欢 潘文欣 陈素贞  
中国科学院力学研究所

## 摘要

本文叙述了采用单仓压送、脉冲气刀及自动成栓几种方式下栓塞型气力输送的实验研究结果。以非球形颗粒的大米在水平管道中的输送为对象,并对自动成栓的机理进行了探讨。在管径50毫米,长约15米的输送管中,不同的供气压力,对应了不同的压降特性和料气输送比,栓塞的长度和运动速度亦有改变。在相同的供气压力条件下,单仓压送较其他几种输送方式有较高的输送效率;而自动成栓输送,因其输送量对气源压力不敏感,有稳定的质量流量。

## 一、引言

栓塞状的气力输送自六十年代问世以来,由于它在节省能耗、减少物料磨损和破碎以及降低噪音和粉尘污染等方面显示的优越性,得到世界各国工业界的普遍关注与重视,并已在化工、采矿、粮食、食品加工及建材行业中得到了应用。其中以内、外旁路二次吹气成栓方式和脉冲气刀成栓方式使用得最为普遍<sup>[1-6]</sup>。在栓塞状气力输送状态下,粒子和气体的相互作用形态十分复杂,虽然普遍认为:其主要机制是气体以静压方式推动粒子群体(即物料栓塞)前移,但在栓塞的形成过程和栓塞以波运动的形式前移过程中,始终存在着粒子与气体、粒子与粒子之间的相互作用,呈现出极为复杂的动量和能量交换,再加上粒子与输送管壁面的磨擦作用,至今未能对其建立细微的物理描述和气体与粒子群体运动之间的力学模型。尽管在实际使用与设计中有了一些工程计算的方法,但因受物料及输送特征参数的影响存在着局限性,其中关键性的参数还要依靠实验或试验来确定,因此栓塞状气力输送的研究亟待深入。Y. Morikawa等在水平管道中,以内重管二次吹气成栓方式用实验方法系统研究了供气流量、吹气形式等对栓塞流动形态及特性的影响<sup>[7]</sup>。K. Konrad等人则从理论上,试图以气液模拟类比和散体力学(Powder Mechanics)的原理来解决栓塞状输送的总压降关系,并导出了求得粒子平均速度的方程式<sup>[8]</sup>,但距表征这种特定的两相流动形态本构关系的力学基本方程还有差距。因此,对不同品种的物料和输送管路特征,其栓塞状流动形态与总体压降特性的研究尚需继续开展。

作为工业应用最为关心的问题是如何既能高可靠、稳定地形成和保持栓塞状的输送状态,同时又具有较高的输送效率,并能适用于不同的物料特性(粒度、形状、材质和粘结性等)

和不同的管路特性（长度、管径、弯头、管材质地等）。在这方面，国内不同行业的专家学者已做了大量工作。对于非球形颗粒的柱塞状输送，以稻谷、麦粒等散料为例，因其长细比较大，大多为粘结性很低而透气率较高的物料，相对来说，难以形成稳定的柱塞。然而这类物料在工业界特别是化工、粮食系统中广泛存在，因而如何建立稳定的成栓条件和确定稳定的输送参数对于积累基础数据，提供系统设计参考是十分必要的。

本文以非球形颗粒的大米为背景，在一个小型多功能实验装置上，首先调试出大米的自动成栓工况，即无二次吹气和脉冲气刀控制下形成稳定的柱塞状输送，之后以单仓压送和脉冲气刀控制来形成大米的柱塞状输送。依靠以微机为中心的一整套实验数据采集、显示、处理系统测定了柱塞压降及运动特性，系统地观察和比较了几种不同成栓方式下输送状态随工作压力、气刀控制时间等因素变化的规律。并探讨了自动成栓的机理。

## 二、实验装置和测试系统

实验是在一个小型多功能的气力输送装置上进行的，如图1所示。图中A、B、C分别为主管道气路、脉冲气刀气路和料仓气路阀门。自动成栓时，仅打开阀门A，关闭阀门B和C，由于料仓出口压力与料仓内的压力随柱塞的脱落而起伏变化，因而形成了稳定的柱塞状输送；单仓压送时，仅打开阀门C，关闭阀门A和B，此时亦可形成稳定的柱塞流；脉冲气刀输送时，打开阀门C，关闭阀门A，同时以脉冲方式交替打开、关闭阀门B，以形成脉冲气刀的柱塞状输送。此外本文还试验了阀门A和C同打开

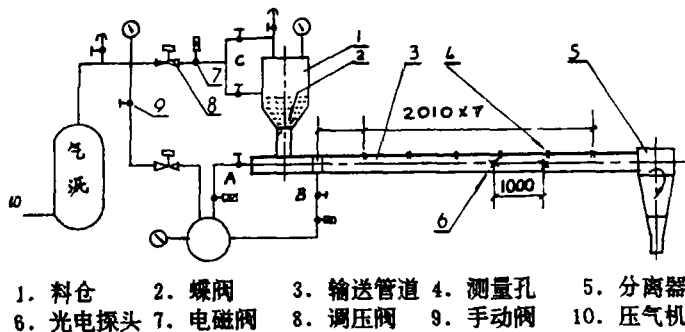


图1. 实验装置示意图

的情况。本实验装置料仓容积约为 0.24 立方米，气罐容积 0.9 立方米，实验所用输送管路为内径 50 毫米的有机玻璃管，全长 14.7 米，在其末端接一旋风分离器和积料斗。

试验用的非球形颗粒为一般市购机米，其截面直径约为 2 毫米，长度在 5~6 毫米间，容重为 830 公斤重/立方米。物料在实验前装入料仓，在密闭状态下输送。气源压力由一台小型压气机提供，实验所需工作压力由调压阀调至设定值。本次实验根据管长及输送特征，压力范围为 30 至 55 KPa。

测试系统由测定压力变化的多点压力测量系统和测定柱塞运动特性的光电检测系统组成。应变式压差传感器输出的电压信号经 1000 倍高增益直流放大器放大后输送给微机的 AD / DA 板，转换为数字信号。柱塞运动的光电信号是通过二组双探头远红外光电探测器检出的，它既可测出二组探测器之间柱塞平均运动速度，亦可得到柱塞经历一个探测器时的当地速度，其信号亦由微机的 AD 板记录。有关测试系统的详细描述可参看文献 [9]。由于大米粒径相对高空间分辨率的光电检测探头显得太大，实验时，因零散米粒的扫过使得柱塞运动的光电

记录添加了一些“干扰”信号，经过数据处理，消除了它们的影响，从而得到合理的柱塞运动的统计平均特性参数。一般实验采样时间为

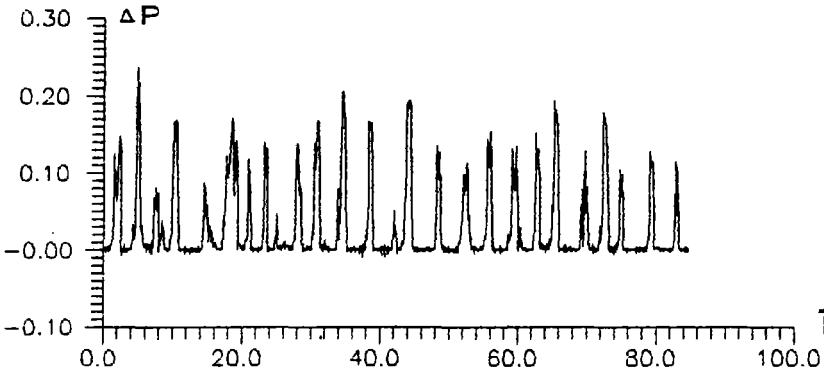


图2. 典型的压力记录曲线(自动成栓)

90~120秒，以输送管末端测点的压力信号为例，示于图2。虽然大米的成栓特性较差，但从所记录的压力信号看，输送是以稳定的柱塞状态进行的，

即测点的压力升高是由于柱塞进入引起的，并随柱塞脱落至旋风分离器中而下降，其间基本上保持一水平线。当然由于柱塞长短各异，压差的峰值也有所不同，峰值均匀的压力信号相应于规律均匀的柱塞输送状态。

### 三、实验结果和讨论

#### 1、单仓压送的柱塞流

实验中以单仓压送方式输送大米，在实验的压力范围内并没有出现柱流式输送，而是稳定的柱塞状输送。其栓长略比自动成栓时长些，对其成因尚待深入研究。大米的质量流量 $G_s$

$G_a, G_s, \Delta P, U, \mu$

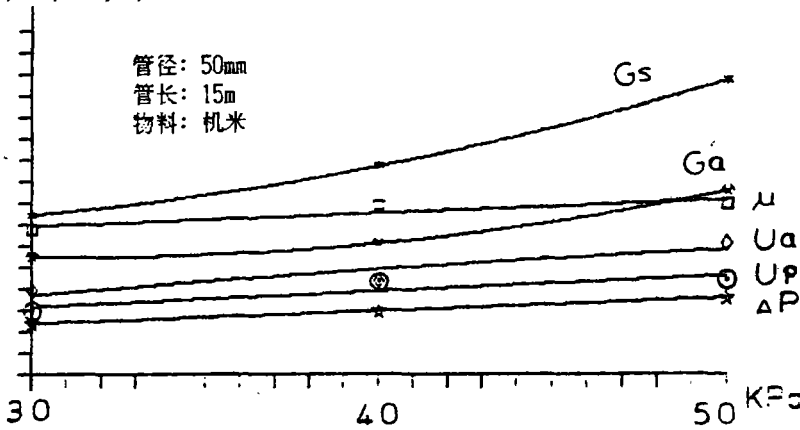


图3. 单仓压送柱塞流的特性参数

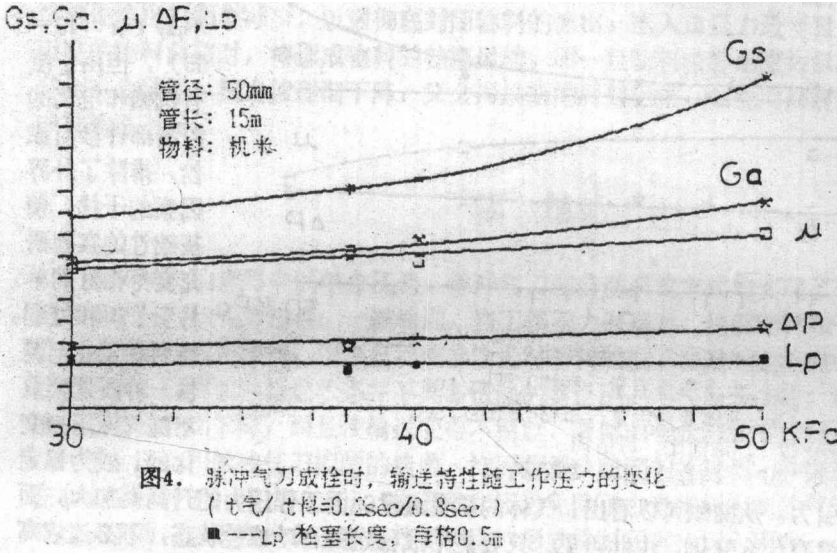
◆---  $U_a$  气流平均速度，每格0.5m/sec  
 ○---  $U_p$  柱塞平均速度，每格0.5m/sec

和气体的质量流量 $G_a$ 以及柱塞上的压力降 $\Delta P$ 均随工作压力升高而增加，同时输送比 $\mu$ 也随之略有提高(见图3)。图中还画出了柱塞的平均运动速度 $U_p$ 和气流的速度 $U_a$ ，前者由光电探测器检测出柱塞经过时的时间并经数据处理而得，后者则通过气体总

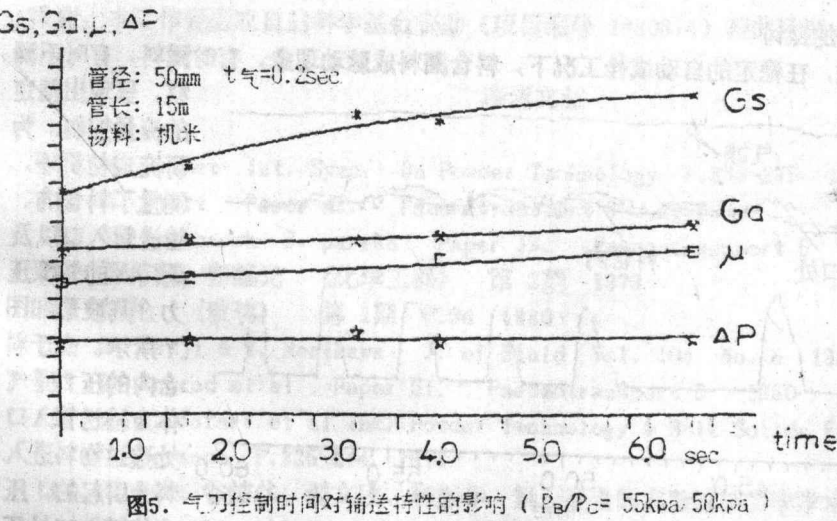
质量流量计算而得，它们反映的均是一段期间的平均值。由图可知，柱塞速度是小于气流速度的，两者之比约为 0.75。若 A、C 两路阀门同时打开，将得到类似的结果，但因气体流量  $G_a$  加大反而降低了输送比  $\mu$ 。一般地说，这种单仓压送条件下的输送比，比文献 [4, 10] 关于大米的栓状输送高 2~4 倍，因此对于工业应用这是一种有价值的输送方式。

## 2、脉冲气刀的栓状流

首先在气刀控制时间固定（供气时间  $\Delta t_a$  为 0.2 秒，间隔时间即供料时间  $\Delta t_b$  为 0.8 秒）



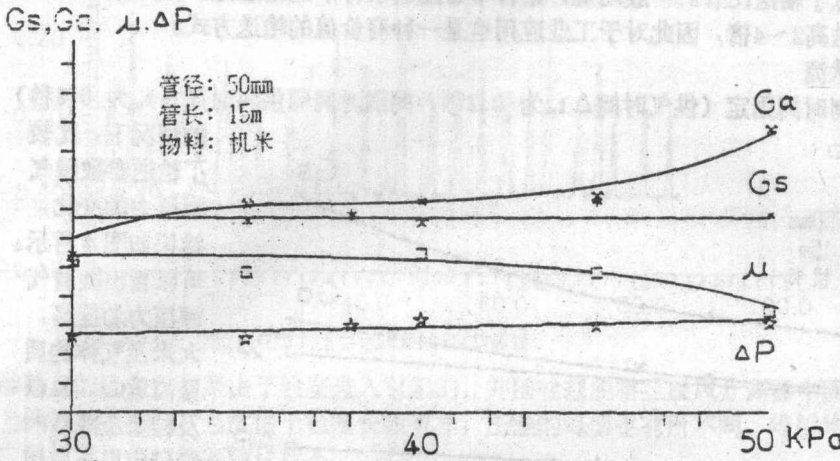
的情况下，比较了输送参数随气源压力的变化，结果如图 4 所示。可以看出随着气源压力的提高，大米及气体的质量流量  $G_s$ 、 $G_a$  以及柱塞压降  $\Delta P$  都相应提高，但柱塞长度  $L_p$  基本上不变，这是由于脉冲气刀控制时间固定引起的。当气罐和气刀压力都保持不变（ $p_a/p_c = 55 \text{ KPa}/50 \text{ KPa}$ ）时，以一定的气刀供气时间（ $\Delta t_a = 0.2$  秒），观察了供气周期的影响，即供料时间  $\Delta t_b$  从 0.4 秒至 8.4 秒。这时物料质量流量  $G_s$  和输送比  $\mu$  均随供料时间增加而有所增加，但气体的质量流量  $G_a$  基本上没有变



化，这也是因为限定了供气时间的缘故（见图 5）。

### 3、自动成栓的栓塞流

在压力范围30~50kPa 范围内, 均获得了大米的自动成栓输送状态。实验测定结果表明, 虽然供气条件变化了 1.7倍, 但物料的质量流量 $G_s$ 几乎没有变化(见图3), 说明其成栓条件

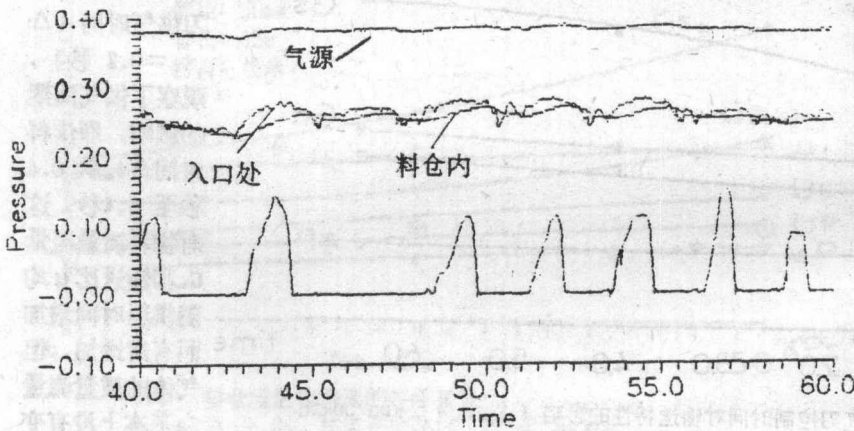


主要由实验设备的特定结构决定。虽然这时的料气输送的比并不高 ( $\mu = 45 - 55$ ), 但由于没有机械和电气的控制部件参与成栓, 排除了外界因素的干扰, 使基础性的实验研究变得相对简单, 易于分析和处理。特别对工业上提供一种质量流量不随气源压力变化的、较为稳定的

的输送状态具有吸引力。从曲线可以看出, 气体的质量流量 $G_a$ 因工作压力的升高而加大, 而栓塞的压降 $\Delta P$ 并没有什么变化, 由此可见, 只要能形成稳定的自动成栓状态, 不必追求高的工作压力。

### 4、自动成栓机理的探讨

实验观察发现, 在稳定的自动成栓工况下, 料仓漏料成脉动现象, 有时漏料, 有时不漏料, 呈现出稳定的流量控制。为研究成栓机理, 测量了料仓内、



输送管入口以及阀门A的气源压力, 其波形如图7所示。由于料仓内的压力是气体自输送管入口处透过物料进入料仓引起的, 压力值随入口处压力的波动而变化,

而入口处的压力又受到输送管末端不停脱落的运动栓塞的影响。因此管道内、入口处及料仓内的压力相互作用结果,形成了无外加成栓方式下稳定的栓塞状输送。由图可见,料仓内的压力波动明显滞后且幅度小于输送管入口处的压力,即入口处压力与料仓内压力之差值时正时负。当入口处压力降低时,料仓内压力亦随之降低,压力差值为负,物料以大于自身自由下落的速度从料仓中流出,堆积在管道入口处,形成局部阻塞。局部阻塞的结果使入口处的压力升高,料仓内压力亦升高,压力差值变为正。当此差值与物料自重引起的压力值平衡时,将迫使流出的物料减少,以致彻底封闭物料的流出。当入口压力进一步提高到足以推动局部阻塞的物料前移时,将形成物料的栓塞运动。而一旦物料由静止变为运动,入口处压力亦从总压变为静压,压力值逐渐下降,又会形成新的局部阻塞。如此周而复始形成了稳定的自动成栓输送工况。

#### 四、结论

在15米长的管路中以单仓压送、脉冲气刀和自动成栓方式均实现了以非球形颗粒为特征的大米的栓塞状气力输送。一般地说,当工作压力提高时,将使物料和气体的质量流量增加,栓塞的压降也有所增加。但在自动成栓输送时物料的质量流量基本不变,因此有相对稳定的输送效率。然而这种输送状态并不具备很高的输送比。当气压升高时,由于气体质量流量增加,不仅输送比下降,而且使输送变得不稳定,最终由栓状流蜕变成稀相输送。

单仓压送和脉冲气刀控制的输送,均可获得较稳定的栓塞流,并能得到较高的输送比,在本实验条件下,高达80~85。由于单仓压送免除了由电磁阀控制的气刀机构,工作时更为可靠。然而,对于在单仓压送条件下栓塞的形成机制还有待深入研究。

致谢:本工作受国家自然科学基金资助(项目编号 1880374)特此致谢。

#### 参考文献

- [1] M. Bounet Int. Symp. On Powder Technology P.265-275 1981
- [2] W. Flatt Paper A3. Pneumotransport 3 1976
- [3] W. Krambrock S. parekh Paper J3. Pneumotransport 5 1980
- [4] 陈维纽、曾耀光 《化学工程》 第2期 1979
- [5] 杨伦 《玻璃》 第1期 P.34 1980
- [6] Y. Tsuji & Y. Morikawa J. of Fluid Vol. 104 No. 8 1982
- [7] K. Konrad et al Paper E1. Pneumotransport 5 1980
- [8] J. F. Jafari et al Int. Powder Technology & Bulk Solids Exhibition and Conferance P.225-244 1979
- [9] 马家欢、谷筋华、潘文欣、李振华 第三届全国实验流体力学学术会议论文集 P. 109-204 1990
- [10] 川上登,田所捻 《粉体工学研究会志》 Vol. 10 No. 9 P.623 1973