

脉冲式密相气力输送水平管中的料栓行为

郭艳, 易江林, 金涌, 俞芷青

(清华大学化工系, 北京 100084)

摘要:探讨了聚丙烯颗粒在脉冲式密相气力输送水平管中的料栓行为. 结果表明在一定操作气速下, 料栓的长短变化有规律, 料栓的运动速度随其长度而变; 栓长为 1 m 左右的聚丙烯颗粒由栓状流向沙丘流型转变的料气速度之比为 0.7~0.8, 出现在操作气速 5 m/s 左右; 单个料栓的压力梯度与其长度有关, 沿单个料栓的压力梯度和截面固含量随气速而变; 料栓压降与操作气速无关.

关键词:脉冲式密相气力输送; 料栓; 流动方式; 压降; 聚丙烯颗粒

中图分类号: TQ022.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)02-0147-05

1 前言

脉冲料栓式密相气力输送技术以具有速度低、固气比高、能耗低、静电积累少、固体颗粒破碎小、管道磨损小以及分离、除尘净化系统大为简化等优势, 在近十几年来得到了世界各国的重视, 在众多行业中广泛应用^[1,2], 已成为输送粉粒状物料的新途径. 但因其机理复杂, 受物性、操作条件、设备等因素的限制, 目前它的理论研究尚处于发展阶段. 本工作在一输送管线总长 30 m(其中水平长 19 m, 垂直高 11 m)、管线内径 50 mm 的密相气力输送实验装置上对聚丙烯颗粒输送在水平管中的料栓行为进行了实验.

2 实验装置和方法

2.1 实验装置

实验装置属于气刀式脉冲密相气力输送类型, 其中输送管线为水平长度 19 m、垂直高度 11 m、管径 50 mm 的不锈钢管, 共有 9 个弯头, 5 个垂直 90°弯头, 4 个 90°水平弯头, 曲率半径均为 500 mm. 为便于实验观察, 管线中设有 4 节长 800 mm 的玻璃段, 水平、垂直各两段. 管线布置如图 1 所示. 输送系统由单片机控制多个电磁阀联动作用, 实现对物料自动、连续、稳定的输送. 实验物料为 $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的聚丙烯颗粒, 密度 970 kg/m^3 , 堆积密度 560 kg/m^3 , 堆积角 30° .

2.2 实验方法

脉冲气刀将进入输送管中的密集物料切割成一定长度的料栓, 依靠压力差克服管线的摩擦阻力向前运动, 实现栓状流的静压式输送. 料栓上的压力梯度 dp/dl 由微压差传感器检测, 传感器输出的电压信号与所作用的压差大小成线性正比关系.

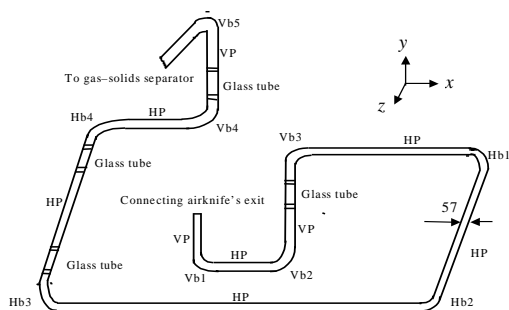


图 1 管线布置图

Fig.1 Configuration of conveying pipeline
(HP: horizontal pipeline, VP: vertical pipeline
Vb1, Vb2, Vb3, Vb4, Vb5: vertical bends
Hb1, Hb2, Hb3, Hb4: horizontal bends)

利用电容传感器,检测由气固两相混合物介电常数的变化所引起的传感器电容量的变化来得到混合物内气固两相的含率.电信号由记录仪采集、处理、再现,得到输送管线中物料浓度随时间的变化;通过对两个相邻 250 mm 的电容传感器信号的互相关处理得到料栓的速度、长度及其随气速的变化规律.气速采用煤气表测量,为空管气速.

3 实验结果与讨论

3.1 一定操作气速下料栓长度的变化规律

为便于实验观察,在白色透明的聚丙烯颗粒中掺入了 1% 的有色颗粒作为示踪颗粒.从 800 mm 长的玻璃管上观察到下列规律:较短料栓($l_p < 0.4$ m)运动速度较慢,或者被后面的长料栓追上合并变长,或者自行变短进而消失,留下相对较厚的底层尾部;适中长度的料栓($0.4 \text{ m} \leq l_p \leq 1.2$ m),运动速度相对较快,若其前面的滞留底层较薄,则会变得越来越短,若其前面的滞留底层较厚,则将铲起滞留层中的颗粒使其成为自身的一部分而变得越来越长;但当料栓长度 $l_p > 1.0$ m 时,它将断裂变为两个料栓或多个料栓,尾部底层较薄.料栓就是如此在输送管内合并、断裂、再合并、再断裂,从而不断变长又变短地运动着.

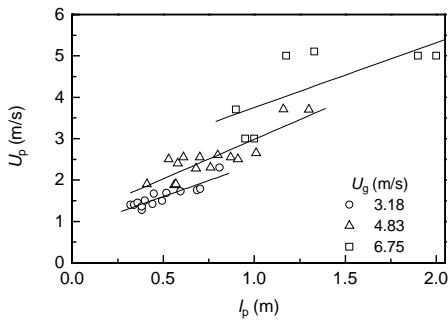


图 2 料栓运动速度与料栓长度的关系
Fig.2 Plug velocity vs. plug length

料栓运动速度 U_p 与其长度 l_p 的关系如图 2 所示.由图可见,同一操作气速 U_g 下,料栓速度随其长度增长而线性增大;不同操作气速下的料栓速度与其长度的关系线近于平行.这是因为:空管气速由两部分组成,一部分气体以气节的形式流经管线,速度等于料栓速度,另一部分气体则是渗透穿过前面的料栓,速度大于料栓速度.当料栓较长时,气体渗流的阻力变大,使得渗流速度变小,而总的气流量相同,因此必然造成气节速度的提高,从而使长料栓具有较大的运动速度.

3.2 聚丙烯颗粒物料在水平管中的流动形态

对聚丙烯颗粒在水平输送管线中以静压能为主的栓状流态及其转变进行了实验观察和检测,栓长为 0.8~1.2 m 的料栓检测结果如图 3、4 所示.图 3 为水平管上某一位置处,管截面的固含量 α (%) 在不同操作气速下随时间 t 的变化曲线,图中 α_0 为管截面上固体颗粒密度为堆积密度时的含量.由曲线可知颗粒在输送管线中的流动形态及其转变.当气速较低时($U_g = 1.8$ m/s),料栓形态规则,尾部底层较厚,运动速度较慢;气速增大至 2.5 m/s 时,料栓形状仍较规则,但尾部底层变薄,料栓速度加快,管截面密度仍等于或接近堆积密度;当气速进一步增大至 5 m/s 左右时,不规则形态的料栓开始出现,滞留底层几乎消失;气速再增大到 7.2 m/s 时,料栓消失,颗粒的流动形态完全变化,形为沙丘式,管截面密度均小于堆积密度,且物料运动速度增加变缓,与气流速度之比明显下降,由 0.8 变为 0.6,如图 5.这是因为颗粒流动形态变为沙丘式流动后,气流通过沙丘上方的狭窄通道时,速度会骤然上升,超过了颗粒的沉降速度,从而将其前面滞留底层中颗粒卷起,从沙丘上方吹走,出现了滞留底层消失的现象,形成管道上方为动压输送、下方仍为静压式输送的流型,从而使管道中的物料运动速度增加变缓.

图 4 为料栓压力梯度 dp/dl 在不同气速下随时间 t 的变化曲线.料栓经过两个相距 250 mm 的微压差传感器所显示的曲线,在低气速下较相似,随气速的升高,相似性减少,在气速为 7.6 m/s

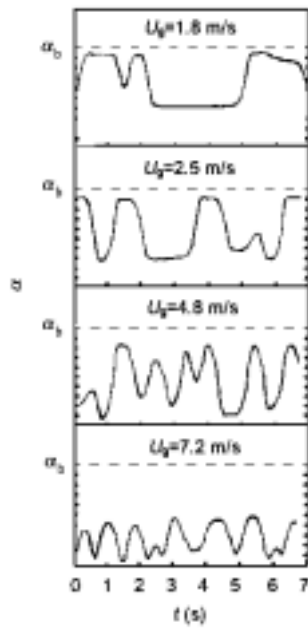


图 3 不同操作气速下物料的流动方式
Fig.3 Plug flow patterns at various air velocities

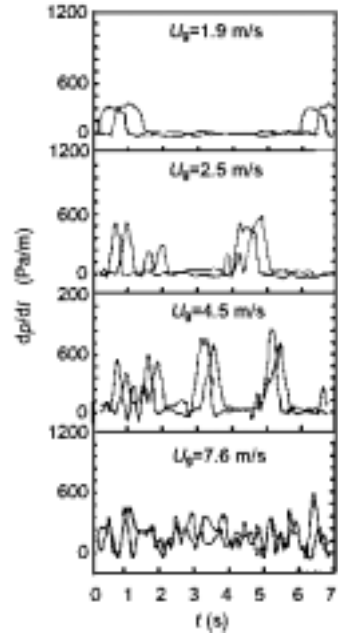


图 4 不同操作气速下料栓上压力梯度分布
Fig.4 Pressure gradient along pipeline at various air velocities

时, 曲线波形紊乱(沙丘流), 从两条波形曲线的相似程度也可判断出物料的流动从栓状流向沙丘式流动的转化过程. 7.6 m/s 时, 曲线波形紊乱(沙丘流), 从两条波形曲线的相似程度也可判断出物料的流动从栓状流向沙丘式流动的转化过程. 以上实验结果表明: 对于 1 m 左右的聚丙烯颗粒料栓, 由栓状流向沙丘流转变的料气比为 0.7~0.8, 出现在操作气速 5 m/s 左右. 所以, 在本实验条件下水平管输送的最佳操作气速为 5 m/s 左右.

3.3 单个料栓的压降

3.3.1 单料栓压降与其长度的关系

压降参数是密相气力输送系统的工业设计中最重要的参数. 许多研究者^[3,4,6,7]在建立柱状流压降模型中, 以料栓中的颗粒密度等于或接近颗粒的堆积密度为前提, 即视整个料栓上的压降分布均匀, 料栓的压力梯度与料栓长度无关, 从而得到单个料栓的压降与料栓长度成线性关系的结论. 表 1 列出的是一些研究者的结果.

表 1 一些研究者关于单个料栓压降的研究结果
Table 1 Results of some researchers on pressure drop across a single plug

| Author | Material | Particle diameter (mm) | Pipeline diameter (mm) | Maximum plug length (m) | Results |
|-------------------------|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Lippert ^[5] | Alumina | 0.066 | 20, 30, 40 | 0.7 | P is proportional to L^2/D |
| Flain ^[7] | Alumina | 0.066 | 20, 30, 40 | 0.7 | P is proportional to L^2 |
| Dickson ^[6] | Glass bead | 1.5, 0.07 | 44 | 1.6 | P is proportional to L |
| Lilly ^[7] | Polypropylene | 3.2, 4.4, 1.0 | 25.4, 50.8, 95.25 | 0.95 | P is proportional to L |
| Klinzing ^[4] | Coal powder | 32 | 25.4 | 3 | P is proportional to L |

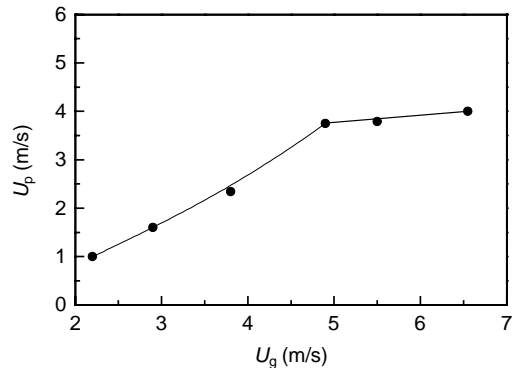


图 5 物料流速与表观气速的关系
Fig.5 Plug velocity vs. superficial gas velocity

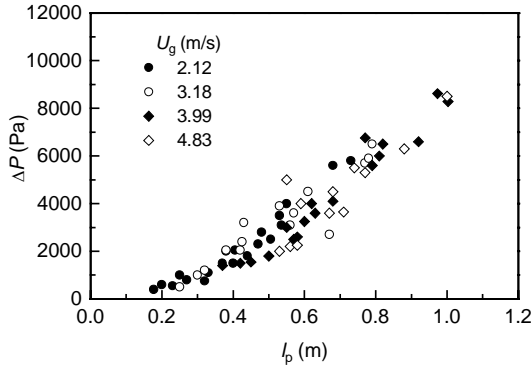


图 6 单个料栓压降与栓长的关系
Fig.6 Pressure drop vs. plug length

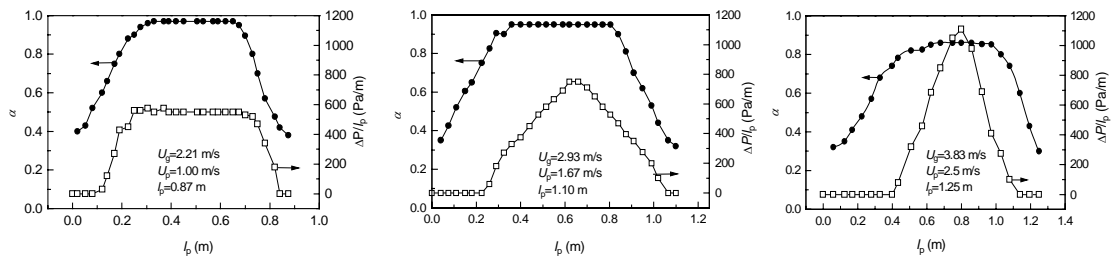


图 7 料栓上的截面固含量分布和压力梯度分布
Fig.7 The profiles cross-sectional solid concentration and pressure drop per unit length of plug

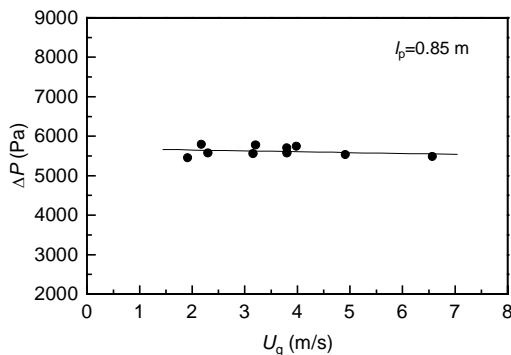


图 8 单个料栓压降与表观气速的
Fig.8 Pressure drop vs. gas velocity

本输送系统聚丙烯颗粒单个料栓压降与其长度的关系如图 6 所示. 由图可知, 聚丙烯颗粒单料栓的压降与其长度的平方有关.

图 7 为沿整个料栓的压力梯度分布和固含量分布. 由图可见, 气速较低($U_g=2.21$ m/s)时, 压力梯度沿料栓分布两端呈直线下降, 中间有较长一段分布较均匀, 曲线形状与料栓形状相似; 当气速略有增加($U_g=2.93$ m/s)时, 虽然固含量分布变化不大, 但压力梯度分布则发生较大改变, 变为中心最大, 向两端减小, 曲线向三角形过渡.

3.3.2 料栓压降与操作气速的关系

图 8 为 $l_p=0.85$ m 的料栓在不同操作气速下的压降变化. 由图可见, 定长料栓的压降与操作气速无关. 这是因为料栓的压降主要用来克服料栓与管壁的摩擦阻力, 而该阻力对一定长度的料栓是一定的, 所以与气速无关. 气速的增加, 只是使料栓的运动速度加快, 但气固间的相对速度并不改变.

4 结论

在一套输送管线总长 30 m (水平长 19 m, 垂直长 11 m)、内径 50 mm 的密相脉冲气力输

送装置上进行了聚丙烯颗粒于水平管中料栓行为的实验, 得出下述结论:

- (1) 在一定操作气速下, 料栓的运动速度随料栓长度的变长而加快; 运动中的料栓长度的变化与其原来长度有关.
- (2) 对于栓长为 1 m 左右的聚丙烯颗粒料栓, 由料状流向沙丘流型转变的料气速度之比为 0.7~0.8, 出现在 $U_g=5$ m/s 左右. 在本实验条件下, 水平管输送的最佳操作气速为 5 m/s 左右.
- (3) 一定长度的料栓($0.4\text{ m}<l_p<1.2\text{ m}$), 其压降与操作气速大小关系不大, 与料栓长度平方有关,

随气速的增加,料栓上的压力梯度分布由梯形向三角形转化,表明沿料栓长度的压力梯度变化规律与料栓长度有关。

参考文献:

- [1] David M. Pneumatic Conveying Cost-effective Design [J]. Chemical Engineering, 1990, 2(1): 70–82.
- [2] Stoess H A. 气力输送及其应用 [M]. 余洲生编译. 北京:人民交通出版社, 1989. 1–189.
- [3] Konard K. Dense-phase Pneumatic Conveying: A Review [J]. Powder Technology, 1986, 49(1): 1–35.
- [4] Aziz Z B, Klinzing G E. Dense Phase Plug Flow Transfer: The 1-inch Horizontal Flow [J]. Powder Technology, 1990, 62(1): 41–49.
- [5] Klinzing G E, Rohatgi N D, Zaltash A, et al. Pneumatic Transport—A Review [J]. Powder Technology, 1987, 51(2): 135–149.
- [6] Dickson A J, Skews B W, Marcus R D. Plug Phase Conveying [A]. Stephens H S, Stapleton C A. Pneumotransport 4 [C]. California: BHRA Fluid Engineering, 1978. 55–80.
- [7] Flain R J. Prediction of the Pressure Drop for Horizontal Dense Phase Pneumatic Conveying System [J]. Process Engineering, 1972, 11(1): 88–100.

Behavior of the Gas-granule Plug Flow along a Horizontal Pipeline

GUO Yan, YI Jiang-lin, JIN Yong, YU Zhi-qing

(Dept. of Chem. Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The investigation on the horizontal plug flow of polypropylene granules was conducted in a dense-phase pneumatic conveying system with pipeline of 50 mm in diameter, 11 m of vertical section and 19 m of horizontal section. The mini-pressure drop sensor and solid pipeline section concentration detector were used. It is found that the length of plug moving in the pipeline changes with time. The profiles of cross-sectional solid average concentration and pressure gradient along plugs vary with the gas velocity. The pressure drop across the plug is proportional to the square of plug length and independent of the gas velocity.

Key words: dense-phase pneumatic conveying ; plug ; flow pattern ; pressure drop ; polypropylene granules