

# 废塑料气力输送管道压力损失的研究

庞建明,汪志全,龙世刚,孙刘恒

(安徽工业大学 冶金与资源学院,安徽 马鞍山 243002)

**摘要:**在废塑料气力输送过程中,管道压力损失是重要参数之一。由实验得出废塑料输送管内气力输送附加压力损失系数与弗劳德准数的定量关系式,废塑料颗粒平均速度与单位管长压力损失的关系。

**关键词:**废塑料;气力输送;压力损失

**中图分类号:**TF538.6 **文献标识码:**A

## Study on Pressure Loss in the Pipe of Pneumatic Conveying of Waste Plastics

PANG Jian-ming, WANG Zhi-quan, LONG Shi-gang, SUN Liu-heng

(School of Metallurgy & Resource, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

**Abstract:**The pressure loss in the pipe of pneumatic conveying of waste plastics is one of the important parameters. The quantitative relational expression is obtained about the coefficient of additional pressure loss and the Froude number by experiment, and the relation is made clear between the average speed of waste plastics particles and the pressure loss of per unit length.

**Key words:** waste plastics; pneumatic conveying; pressure loss

## 引言

从国内外的应用和发展来看,高炉喷吹废塑料不仅可行,而且是比较理想的废塑料处理方式,能够取得较好的经济效益、环保效益和社会效益。废塑料颗粒的输送又是高炉喷吹废塑料的基本和关键环节。在输送过程中,管道压力损失是重要参数之一,此参数在喷吹系统的设计、管道排布及经济分析等方面有重要影响。因而全面了解废塑料输送过程中压降特性是非常有意义的。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

本实验使用的废塑料颗粒都是由本课题组自行研制的冷态破碎机和微热塑化造粒机制得的<sup>[1]</sup>。聚乙烯简称PE,聚丙烯简称PP,对本二甲酸乙二醇简称PET。PE3~5表示粒度为3~5 mm的PE塑料,PE5~10表示粒度为5~10 mm的PE塑料,PP0~3表示粒度为0~3 mm的PP塑料,其它的依此类推,测得的废塑料颗粒的物理性能如表1所示。

### 1.2 实验装置及方法

为了比较全面地研究废塑料颗粒输送过程中的压力损失情况,本实验的管道排布包括水平段、垂直段、水平弯管、垂直弯管4部分,其布置情况如图1。空气压缩机和储气罐作为输送气源,最大压力为0.8 MPa;喷吹罐容积为0.22 m<sup>3</sup>,给料速度由螺旋

表1 废塑料颗粒的物理性能

塑料种类	粒度/mm	堆积密度/(kg/m <sup>3</sup> )
PE	3~5	266.15
	5~10	213.00
PP	0~3	207.34
	3~5	198.01
PET	5~10	213.16
	3~5	545.96

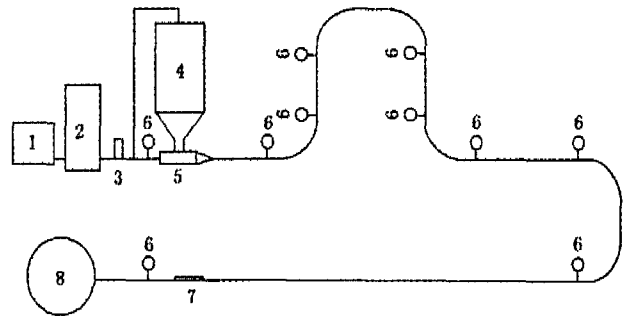
收稿日期:2005-07-18

基金项目:国家自然科学基金和上海宝钢联合基金项目(50274001)

作者简介:庞建明(1980-),男,山东寿光人,安徽工业大学硕士研究生。

给料器的调速电机控制,调速范围 0~60 r/min;管道的总长度为 64 m,输送管道内径为 45 mm,上升段和下降段管长均为 2 m,管路中设计了 6 个曲率半径均为 0.360 m 的 90°弯管。

除了收集器是敞开在大气之中外,其它的输送装置都是密闭的,即废塑料颗粒从喷吹罐,由螺旋给料器推出,经管道各个部分最终到达收集器中。当输送稳定后,换用另一个收集器收集 30 s,这样可以测得喷吹量。气流量由流量计读出。在实验的过程中,同时可以测得各管道的静压(管道内的压力与大气压之差),根据管道前后的压差,即可求得各段管道的压降。由于压降较小,为了保证压力测量的准确,测量时使用水柱压力计。



1 空气压缩机; 2 储气罐; 3 流量计; 4 喷吹罐;  
5 螺旋给料器; 6 压力计; 7 玻璃管; 8 收集器

图 1 废塑料颗粒输送装置示意图

## 2 计算方法

### 2.1 附加压力损失系数的计算方法

在气力输送的压力损失中(即总压力损失  $\Delta p$ ),包括纯气体流动压力损失( $\Delta p_a$ )和物料运动附加压力损失( $\Delta p_s$ )两部分,即

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_s \quad (1)$$

其中,气体的压力损失为:

$$\Delta p_a = \lambda_a \frac{L \rho_a v_a^2}{2gD} \quad (2)$$

物料的附加压力损失为:

$$\Delta p_s = \lambda_s \frac{L \rho_a v_a^2 \mu}{2gD} \quad (3)$$

式(2),(3)相加得:

$$\Delta p = (\lambda_a + \lambda_s \mu) \frac{L \rho_a v_a^2}{2gD} \quad (4)$$

式中: $\lambda_a$ —空气摩擦阻力系数; $\lambda_s$ —物料的摩擦阻力系数; $L$ —管道长度,m; $D$ —管道内径,m; $\mu$ —固气比, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; $v_a$ —气体速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\rho_a$ —气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

试验过程中最大的气体流量  $Q_t \leq 60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , $D$  为 45 mm,管内的最大表观速度为

$$v_{am} = \frac{Q_t}{A} = \frac{60}{\pi \times 0.022^2} = 10.479 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5)$$

最大表观雷诺数为

$$Re_{am} = \frac{v_{am} D}{\nu_a} = \frac{10.479 \times 0.045}{1.52 \times 10^{-5}} = 3.102 \times 10^4 < 10^5 \quad (6)$$

显然,式(6)表明输送过程处于 Blasius 范围( $2320 < Re < 10^5$ )内,因而

$$\lambda_a = \frac{0.3146}{Re^{0.25}} = 0.3146 \times \sqrt[4]{\frac{\nu_a}{v_a D}} \quad (7)$$

式中: $A$ —管道的横截面积, $\text{m}^2$ ; $Q_t$ —气体流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; $\nu_a$ —空气运动粘度系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $v_{am}$ —最大气体速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $Re$ —雷诺数, $Re = v_a \cdot D / \nu_a$ ; $Re_{am}$ —最大雷诺数, $Re_{am} = v_{am} \cdot D / \nu_a$ 。

由式(4),(7)及  $Fr = \frac{v_a^2}{gD}$  得到:

$$\lambda_s = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{2gD}{\rho_a v_a^2} - \lambda_a \right) = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{2gD}{\rho_a v_a^2} - 0.3146 \times \sqrt[4]{\frac{\nu_a}{v_a D}} \right) = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{2}{\rho_a Fr} - 0.3146 \times \sqrt[4]{\frac{\nu_a}{v_a D}} \right) \quad (8)$$

总压力损失  $\Delta p$  可以通过实验测出,因此  $\lambda_s$  可以由式(8)求出。在废塑料颗粒输送过程中,压力损失的大小主要由附加压力损失系数决定。

从式(8)中可以得出  $\lambda_s$  与重力和粘度有关,考虑到气力输送时物料干燥,重力作用比粘度影响大,因而

式(8)可简化为:

$$\lambda_z = f(Fr) \tag{9}$$

根据实验所得的数据,通过线性回归得到附加压力系数与弗劳德数的关系式,为实际应用提供经验公式。

### 2.2 固体颗粒平均浓度 $\varepsilon$ 及平均速度 $v_s$ 的计算方法

固体颗粒平均浓度  $\varepsilon$  及平均速度  $v_s$  由同步截断法测定<sup>[2]</sup>,测量管段距下料口 50 m,通过同时关闭长 1 m 的输送管两端的闸板,确定该管段中具体料重  $W_s$  后,可用下式计算固体颗粒平均浓度

$$\varepsilon = \frac{W_s}{AL_c\rho_s} \tag{10}$$

测量物料输送平均质量流量后进而可得其平均速度

$$v_s = \frac{M_s}{A\rho_s\varepsilon_s} \tag{11}$$

由式(10),(11)得:

$$v_s = \frac{M_s L_c}{W_s} \tag{12}$$

式中:  $A$ —管道横截面积,  $m^2$ ;  $L_c$ —测量管段长度,  $m$ ;  $\rho_s$ —固体物料密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\varepsilon$ —固体颗粒平均浓度,  $kg \cdot kg^{-1}$ ;  $W_s$ —测量管中固体料重,  $kg$ ;  $M_s$ —输送平均质量流量,  $kg \cdot s^{-1}$ 。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 废塑料输送管内附加压力损失系数与弗劳德准数的关系

附加压力损失系数是反映颗粒与气体、管壁以及颗粒之间的冲击和摩擦阻力大小的参数。颗粒是靠气体提供的动力来运动,因而气体压力及颗粒浓度对附加压力系数有明显的影响。固气比越高,由颗粒造成的各种摩擦损失就越大。相应地,附加压力损失系数就越大。也就是说,在总压力损失中,颗粒造成的压力损失比例越大。但  $Fr$  越大,附加压力损失系数却越小。

因为  $Fr = \frac{v_s^2}{gD}$ , 表明了惯性力与重力间的关系,所以当管径一定时,  $Fr$  越大,惯性力越大,重力加速度不变,即速度越快,附加压力损失系数也就越小。

每一种废塑料颗粒压力损失系数( $\lambda_s$ )与弗劳德准数( $Fr$ )的关系如图 2,3 所示,由实验范围内的固气比得到其定量关系如表 2。从图 2,3 中可知,颗粒在管道中运动,当固气比增加,颗粒在管道中的浓度增大,速度降低,阻力增大,易形成料栓,因而增大压力损失。废塑料颗粒压力系数( $\lambda_s$ )随弗劳德准数( $Fr$ )的增大而减少,与煤粉输送压力损失特性基本相似<sup>[3-4]</sup>。当弗劳德数较小时,随弗劳德准数增加,附加压力损失系数迅速减小,当弗劳德数增大到一定值后,附加压力损失系数随之变化较慢。

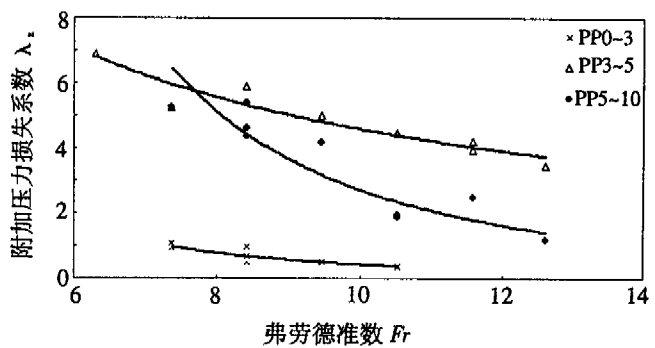


图 2 输送管内不同粒径的 PP 压力损失系数( $\lambda_s$ )与弗劳德准数( $Fr$ )的关系

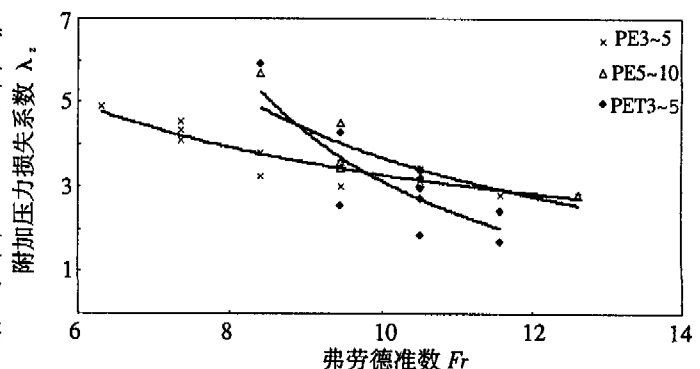


图 3 输送管内不同粒径的 PE 和 PET 压力损失系数( $\lambda_s$ )与弗劳德准数( $Fr$ )的关系

### 3.2 输送管中单位长度压降与颗粒速度的关系

从图 4 中可得,颗粒在管道内气力输送时,随着其速度的增大,单位长度压降也随之增大,因为颗粒在管道内运动时,颗粒的动能是由气体提供的,颗粒的平均速度越大,动能也就越大,所以单位长度压降就越大。当获得同样的动能时,颗粒越

小,颗粒在管道内平均速度就越大,输送时间就越短,压力损失也越小。达到同样的平均速度时,PP0~3所消耗的压力最小,PP5~10所消耗的压力最大。因为平均速度相同时,颗粒小的动能就小,压力损失也就小。

从图5可以看出,PE3~5, PE5~10和PET3~5 3种颗粒在垂直管道内运动时,单位长度压降与其速度的关系变化趋势与图4相似。达到同样的速度时,PE3~5所消耗的压力最小,PET3~5所消耗的压力最大。颗粒粒度相同时,堆积密度小的,单位长度压降也小。

在废塑料输送管中,随着颗粒平均速度的增大,单位长度压降也随之增大。达到同样的平均速度时,同种颗粒,粒径小的压降小。

### 4 结 论

(1)废塑料颗粒输送压力损失系数( $\lambda_s$ )随弗劳德数( $Fr$ )的增大而减少,与煤粉压力损失特性基本相似。当弗劳德数较小时,随弗劳德数增加,附加压力损失系数迅速减小,当弗劳德数增达到一定值后,附加压力损失系数随之变化较慢。

(2)废塑料颗粒在管道内气力输送时,随着颗粒平均速度的增加,单位长度压降也增大,达到同样的平均速度时,同种颗粒,粒径小的,压降也较小。颗粒粒度相同时,堆积密度小的,单位长度压降也小。

#### 参考文献:

[1] 龙世刚,孟庆民,汪志全,等.废塑料微热塑化造粒和环境保护[J].安徽工业大学学报:自然科学版(第七届全国冶金工艺理论学术会议专辑),2003,20(4):278-282.  
 [2] 洪江,沈颐身.水平管高浓度连续气力输送特征研究[J].过程工程学报,1994(2):122-128.  
 [3] 周建刚,张述,王炳生.煤粉气力输送管道压损的实验研究( I ) [J].钢铁研究学报,1993(1):1-7.  
 [4] 周建刚,张述.煤粉气力输送管道压损的实验研究( II ) [J].钢铁研究学报,1994,12(4):1-7.

表2 废塑料颗粒输送压力损失系数( $\lambda_s$ )与弗劳德准数( $Fr$ )的关系

颗粒种类	图号	固气比 $\mu/(kg \cdot kg^{-1})$	回归经验式	$R^2$
PP0~3		0.2~1.3	$\lambda_s=246.89 Fr^{-2.765}$	0.811 6
PP3~5	2	0.2~1.7	$\lambda_s=33.723 Fr^{-0.8686}$	0.891 3
PP5~10		0.2~1.2	$\lambda_s=1905.6 Fr^{-2.8472}$	0.841
PE3~5		0.6~1.7	$\lambda_s=21.604 Fr^{-0.8201}$	0.838 4
PE5~10	3	0.1~1.3	$\lambda_s=150.96 Fr^{-1.6125}$	0.723
PET3~5		0.1~2.2	$\lambda_s=3195.1 Fr^{-3.00093}$	0.615

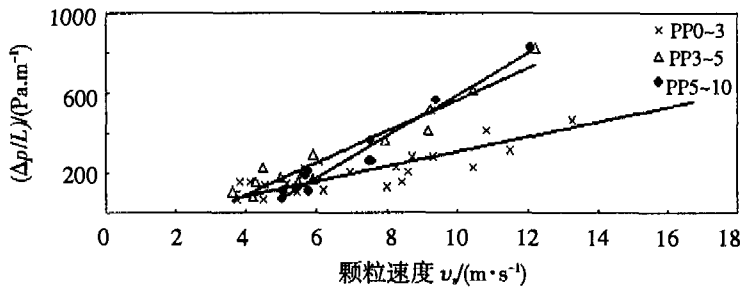


图4 不同粒径 PP 单位长度压降与颗粒速度的关系

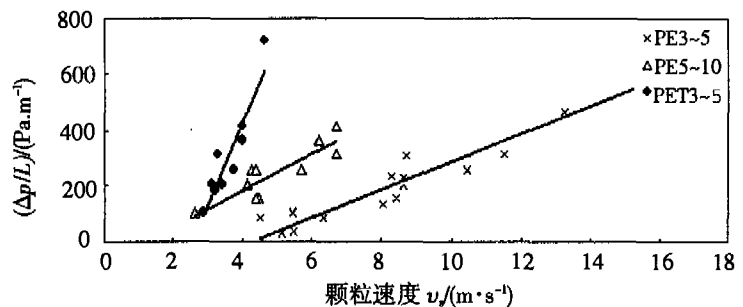


图5 不同粒径的 PE 和 PET 单位长度压降与颗粒速度的关系