

栓状流密相气力输送

范 椿

中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080

摘 要 首先介绍了气力输送的实验设备, 评述了水平栓流气力输送的压力降计算方法, 用3种不同的方法计算了压力降并与实验数据进行比较. 此外评述了用特征线方法进行水平管的数值模拟, 倾斜管的压力降计算和长距离的栓流气力输送. 最后展望了该领域的发展方向.

关键词 栓状流, 密相气力输送, 压力降, 料栓, 料栓速度

1 前 言

气力输送是利用空气在管道内的流动, 将物料沿着指定的路线进行输送. 它在化工、采矿、粮食、食品加工和建材工业有着广泛的应用, 因此得到各国工业界的关注和重视. 物料的管道气力输送技术至今已有100多年的历史了. 在80年代以前大多数气力输送都是在物料全部悬浮的条件下进行的动压输送, 称之为稀相气力输送. 例如, 加拿大 Govier 和 Aziz 教授在1972年出版的《复杂混合物在管道中的流动》一书中认为: “我们将会看到固体可以在2种条件下在流体中进行输送. 一种是处于全部悬浮状态; 另一种是部分甚至完全沉积着而作为一个床层进行运动. 不过, 大多数实际应用都是在全部悬浮的条件下, 或者按习惯说法是‘固体无沉降’条件下实现的.”^[1]. 80年代出现了密相静压气力输送, 物料在充满管道的情况下移动. 如果物料很长, 则移动很困难, 若将料柱切割成一段段短的料栓, 与气栓相间隔着而移动, 即成栓状流密相气力输送. 栓状流密相气力输送与传统的稀相气力输送相比, 具有高的料气输送比, 低的输送气流速度和低的工作压力, 因而前者具有能耗小、磨损小、料粒不易破碎等优点而受到工业发达国家的重视, 对它进行了大量的实验研究和一定的理论研究, 目前已在工业上应用, 使气力输送技术进入了一个新阶段.

2 实验装置和测量系统

2.1 实验装置

实验装置如图1所示, 此为脉冲气刀式栓流气力输送装置系统图^[2]. 被输送物料由进料阀进入料罐, 当到达预定数量时, 关闭进料阀, 压缩空气自料罐的上部进入, 使料罐加压. 同时少量空气自料罐下部进入, 松动粉粒料, 以利排料. 打开排料阀, 料流便进入输送管道了. 输送管道的一端与气刀与电磁阀相连接, 由电磁阀控制产生脉冲气流进入输送管道. 脉冲气流将连续

收稿日期: 2001-06-04, 修回日期: 2002-04-25

的料流切割成较短的料栓，形成气栓和料栓相间地流动，被输送到分离器排出。当料罐送完，先行放气，再打开进料阀进料。为了保持连续运行，可以并联两台料罐，交互进行输送。

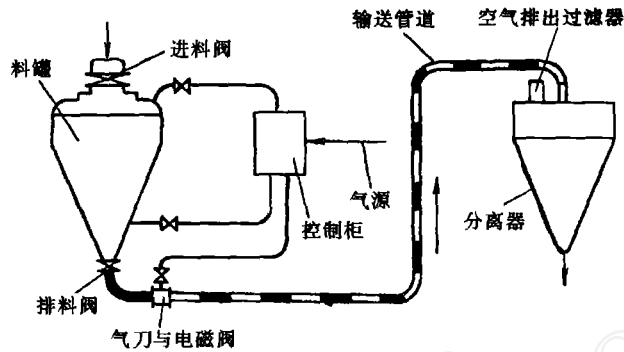


图1 脉冲气刀式栓流气力输送装置系统图

2.2 测量系统

2.2.1 测量装置和测点的确定

在输料管上部开孔，焊上传感器接头座，再安装压力传感器。压力传感器接受的压力信号，变成电流信号输入信号放大器，再接到微机上，绘出压力与时间的关系曲线，此即动态压力示波曲线。

传感器的布置必须遵守以下原则，即前后保持一定间距的“成对布置”。每对传感器的间距，只应稍大于一个料栓的长度，以保证在一对传感器之间只有一个料栓通过。如图2中的①、②测点。一对传感器之间的间距应在测试前根据物料的物性预先估计或参照已有的经验确定。

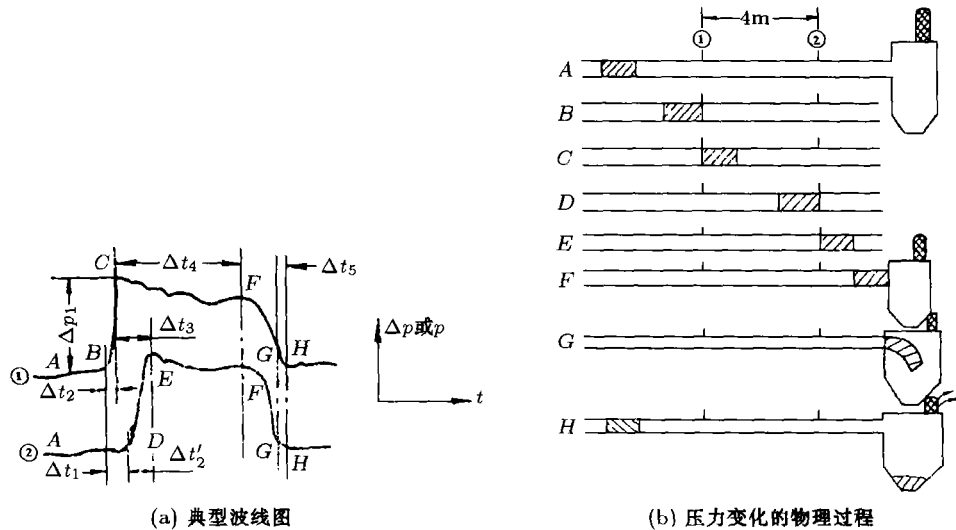


图2 典型波线图及其物理过程

2.2.2 动态压力波线图变化过程的物理实质

对①、②点压力波线图变化过程的物理实质，进行分析可得到料气栓的运动参数值和脉冲输送的阻力。我们考虑①、②点后只有一个料栓的情况。图2(a)所示为典型波线图。图2(b)为压力变化的实际物理过程，其过程如下：

A——料栓未到①、②传感器，①、②点后管道通大气。 B——料栓头刚进入①，由于料

栓中气压作用,使 B 点后压力上升. C ——料栓尾刚离开①,即气栓头刚进入①,故①点接受气栓气压, BC 线的垂直高度 Δp_1 为一个料栓的压力损失,绝对稳定时 CF 线应水平. D ——料栓头刚进入②,此后②点接受料栓中气压而上升. E ——料栓尾刚离开②, E 点后②接受气栓压力, DE 线的垂直高度为一个料栓的压力损失,绝对稳定时 EF 线应水平. F ——料栓头刚达管道出口,而后随着卸料,料栓渐短而阻力减少,①、②点压力下降. G ——料栓尾刚离开管道出口,同时随后气栓喷入卸料器,以后为过滤器排气过程. H ——排气完了,恢复到通大气状态,①、②点基本同时与大气平衡, H 点以后的线称为排空线(水平直线),也是①、②两个压力传感器标定的零线.实际上, F 点后料栓渐短,常被击穿,故进入卸料器时多为稀相.

由上述物理过程可得: Δt_1 ——料栓头部由①点前进到②点所经过的时间; Δt_2 ——料栓全长经过①点的时间; Δt_3 ——料栓尾或气栓头部由①点前进到②点所经过的时间; Δt_4 ——料栓离开①点后,前进时其头部达管出口所经历的时间; Δt_5 ——料栓全长经过管道出口的时间; $\Delta t'_2$ ——料栓全长经②点的时间; p_1 ——在①点处于一个料栓的阻力,也是这时管道中①点的压力.

由上述 Δt_i 可计算出下列参数:

- (1) 在①、②点处的料栓速度: $V_s = 4m/\Delta t_1$;
- (2) 在①点的料栓长度为 $V_s \Delta t_2$;
- (3) 料栓尾或气栓头的速度为 $4m/\Delta t_3$.

3 水平管压力损失的解析计算

1980年英国剑桥大学 Konrad 等^[3]首先提出水平管中栓塞型密相气力输送的压力损失计算方法. 80年代末90年代初中国科学院力学研究所马家欢研究员等^[4]也从事栓塞型密相气力输送的研究. 澳大利亚 Wypych 教授等^[5~7]分别于1994年, 1995年, 1997年等发表多篇文章.

3.1 栓塞型密相气力输送的基本方程

3.1.1 内侧压系数 K_w ^[5]

应力 σ_w 是垂直作用于管壁的法向壁面压力. 对于水平料栓流动, 壁面压力由二部分组成, 如图 3(a)~图 3(c) 所示. σ_{sw} 是料栓重量对管壁的法向壁面压力. 在图 3(d) 中

$$\sigma_{sw} = (1 + \cos \theta) \rho_b g R$$

其中 R 是管道半径, g 是重力加速度, ρ_b 是料栓的堆积密度, θ 是极坐标的角坐标. 轴向压缩应力 σ_x 产生径向压缩应力 σ_{rw} . 比值

$$K_w = \sigma_{rw} / \sigma_x$$

称之为内侧压系数. K_w 就是在计算筒仓应力时水平和垂直应力之比.

对于料栓在管道中平行于管壁运动, Wypych 提出一个 Φ_s 定义为静止内摩擦角, 它比内摩擦角 Φ 小, 并对英国 Konrad 等^[3]提出的计算公式进行修正为

$$K_w = \frac{1 - \sin \Phi_s \cos (w - \Phi_w)}{1 + \sin \Phi_s \cos (w - \Phi_w)} \quad (1)$$

$$\sin w = \sin \Phi_w / \sin \Phi_s \quad (2)$$

其中 Φ_w 是壁面摩擦角, w 是由物性决定的角度量.

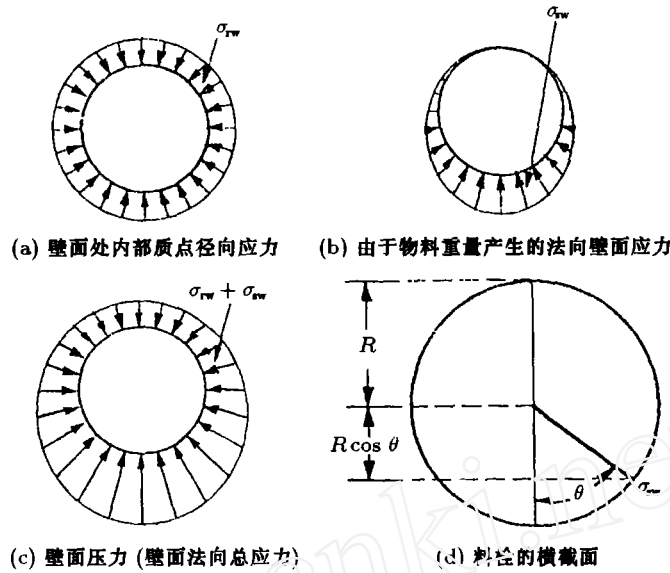


图 3

Wypych 根据实验数据和公式 (1), (2) 得到下列经验公式

$$\bar{\phi}_s = (4/3) \bar{\phi}_w \gamma_b^{1/3} \quad (3)$$

其中 γ_b 是堆积物的比重 (无量纲堆积密度).

3.1.2 力平衡和压力梯度 [7]

图 4 表明在水平管道中, 颗粒料栓单元受空气压力和应力的情况. 图中符号如下: p 和 dp 是 x 方向空气压力和它的增量. 作用在单元两边的压力分别是 pA 和 $(p + dp)A$, 这里横截面积 $A = \pi D^2/4$, D 是管道内径. 在流动方向外力压缩料栓的内部颗粒, 产生 σ_x 和它的增量 $d\sigma_x$, 见图 4. 作用在单元两边的力是 $\sigma_x A$ 和 $(\sigma_x + d\sigma_x) A$.

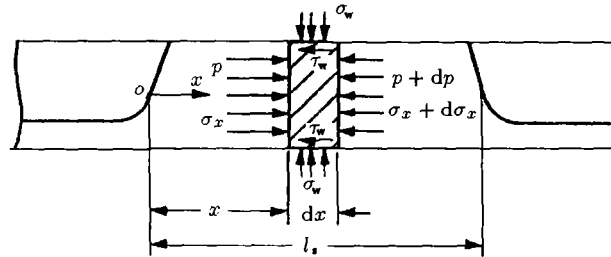


图 4 作用在水平料栓上的空气压力和应力

当一个运动料栓达到定常状态, 驱动和阻力二者达到平衡状态. 假定轴向应力和它的径向转换应力只是 x 的函数, 则作用在长度为 dx 的单元上力的平衡可得

$$\frac{dp}{dx} + \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{1}{A} \int_0^{2\pi} \tau_w R d\theta = 0 \quad (4)$$

其中 τ_w 为壁面剪切应力, R 为管道半径.

假设压力梯度是一个常数, 则

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\delta p}{l_s}$$

其中 δp , l_s 分别是单个料栓的压力损失和长度, 并假定 $l_s \gg D$, 这对于一个正常的柱栓流动是合理的. 式 (4) 的边界条件为

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_f, & \text{在 } x = l_s \text{ 处} \\ \sigma_x &= \sigma_b, & \text{在 } x = 0 \text{ 处}\end{aligned}$$

其中 σ_f 和 σ_b 分别是料栓前面和后面的轴向应力. 上述方程的解就是单个水平料栓的压力梯度的方程, 如下

$$\frac{\delta p}{l_s} = 2\rho_b g \mu_w + (4\mu_w K_w / D) \sigma_f \quad (5)$$

其中 ρ_b 是物料的堆积密度, g 是重力加速度, μ_w 是壁面摩擦系数.

文献 [7] 取 σ_f 为

$$\sigma_f = \rho_b (U_p - U_s) U_s \quad (6)$$

其中 U_p 是料栓的速度, U_s 是料栓中粒子的平均速度.

文献 [5] 取 σ_f 为

$$\sigma_f = \alpha \rho_b U_s^2 \quad (7)$$

其中 α 是静止层中粒子所占管道截面积之比.

3.1.3 气液两相流动比拟

文献 [7] 应用了 Konrad 和 Harrison^[3] 提出的气液两相流动比拟, 如下

$$U_p = U_s + 0.542 (gD)^{1/2} \quad (8)$$

文献 [5] 应用了气液两相流动比拟给出

$$\alpha = 1 / \left(1 + U_s / 0.542 \sqrt{gD} \right) \quad (9)$$

将 (8) 式代入 (6) 式再代入 (5) 式可得

$$\frac{\delta p}{l_s} = 2.168 \rho_b \mu_w K_w (g/D)^{1/2} U_p + \rho_b g \mu_w (2 - 1.175 K_w) \quad (10)$$

3.1.4 料栓质点的平均速度

Konrad 和 Harrison^[3] 假设运动的料栓是一个堆积床, 应用欧根 (Ergun) 公式

$$\frac{\delta p}{l_s} = a U_{sp} + b \rho_a U_{sp}^2 \quad (11)$$

这里 ρ_a 是空气的密度, U_{sp} 是空隙滑移速度

$$U_{sp} = U_a - U_p \quad (12)$$

这里 U_a 是两相交界面的空气速度, a 和 b 是 Ergun 常数

$$a = \frac{150 \eta (1 - \varepsilon)^2}{(d^2 \varepsilon^3)}$$

$$b = \frac{1.75 (1 - \varepsilon)}{(d \varepsilon^3)}$$

其中 η 是空气的黏性系数, ϵ 是空隙率, d 是粒子直径.

Wypych^[5,7] 认为: 在大多数情况下真实的料栓质点是充气床, 因此不可以应用欧根公式.

文献 [5] 基于实验数据提出了一个半经验的 U_p 和 U_a 的关系式. 文献 [7] 则特制一个实验装置来测定 (11) 式中的系数 a 和 b .

将 (12) 式代入 (11) 式可得

$$\frac{\delta p}{l_s} = b\rho_a U_p^2 - (a + 2b\rho_a U_p) U_p + aU_a + b\rho_a U_a^2 \quad (14)$$

将 (10) 式代入 (14) 式可得

$$A_1 U_p^2 + A_2 U_p + A_3 = 0 \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= b\rho_a \\ A_2 &= -\left[a + 2b\rho_a U_a + 2.168\rho_b \mu_w K_w (g/L)^{1/3} \right] \\ A_3 &= aU_a + b\rho_a U_a^2 - \rho_b g (2 - 1.175\mu_w K_w) \end{aligned}$$

解 (15) 式可得

$$U_p = \left(-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3} \right) / (2A_1) \quad (16)$$

因为 $U_a - U_p > 0$, 因此

$$U_p = \left(-A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3} \right) / (2A_1) \quad (17)$$

3.1.5 总压损失

在管道中料栓的总长为

$$L_s = (M_s L) / [A(1 - \alpha)\rho_b U_p] \quad (18)$$

$$\alpha = 0.542\sqrt{gD}/U_p \quad (19)$$

其中 M_s 是物料流量, L 是管道长度, α 是静止层中粒子所占管道截面积之比.

将 (17) 式代入 (14) 式或 (10) 式可得到一个料栓的压力梯度 $\delta p/l_s$, 再乘以 (18) 式可得总压损失

$$\Delta p = (\delta p/l_s) L_s \quad (20)$$

3.2 水平管总压损失的计算步骤

(1) 给定初始数据

物料参数: $\rho_s, \rho_b, \Phi, \Phi_w, d, \eta, \epsilon, \gamma_b$; 管道长度和直径: L, D ; 输送物料流率 M_s , 气体质量流率 M_a .

(2) 根据 (1)~(3) 式计算出 K_w 值.

(3) 假设一个压力损失.

(4) 根据压力损失计算出空气平均密度 (用常温 T_0 , 平均压力和空气状态方程进行计算).

(5) 计算出 (15) 式中的 A_1, A_2, A_3 值, 再根据 (17) 式计算出 U_p 值.

(6) 再根据 (18)~(20) 式计算出总压损失.

(7) 比较计算结果的总压损失和假设的总压损失; 重复计算 (3)~(6) 的步骤, 直到满足精度要求。

3.3 计算结果和讨论

本文用 Wypych(1994 年和 1997 年)^[5,7] 以及 Konrad(1980 年)^[3] 的 3 种计算方法, 计算了栓状流密相气力输送的总压损失, 其数值结果列于表 1。

表 1 压力损失 Δp 的计算结果

物料 流量 M_s/kgs^{-1}	气体 流量 M_a/kgs^{-1}	料气比 μ 无量纲	压力损失 $\Delta p/\text{kPa}$					
			Wypych ^[5]	Wypych ^[7] 主动			Konrad ^[3]	
				$a=441$ $b=5832$	$a=-207$ $b=6084$	计算 a,b $\epsilon = 0.451$	主动 $a=441$ $b=5832$	被动 计算 a,b $\epsilon = 0.451$
0.56	0.05	11.2	28.51	24.19	24.21	25.41	30	43
0.83	0.09	9.22	35.01	32.37	32.38	32.76	35	44
0.83	0.07	11.86	37.46	33.55	33.56	34.29	38	49
0.83	0.05	11.60	43.75	36.32	36.36	38.41	44	60
1.02	0.09	11.33	43.35	39.92	39.92	40.42	43	54
1.02	0.07	14.57	46.59	41.44	41.46	42.40	46	59
1.02	0.05	20.40	55.28	45.07	45.12	47.90	53	70
1.21	0.09	13.44	51.81	47.52	47.52	48.15	51	63
1.21	0.07	17.29	55.96	49.41	49.43	50.63	54	68
1.21	0.05	24.20	67.65	54.01	54.07	57.73	62	78

材料, 黑塑料丸, 管道长度 $L=78\text{ m}$, 管径 $D=105\text{ mm}$

图 5 是 Wypych(1997)^[7] 的论文中给出的实验结果。从表 1 的计算结果和图 5 的实验结果比较, 结果符合得较好。

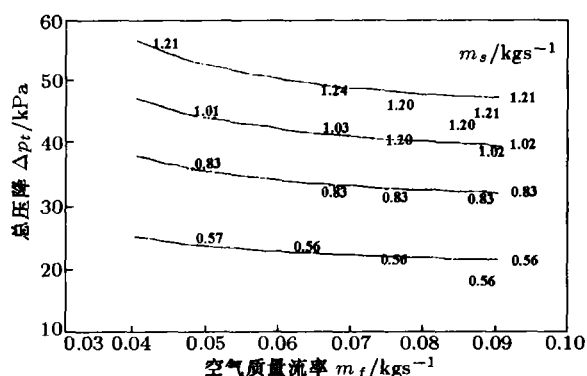


图 5 Wypych^[7] 给出的实验结果

1997 年澳大利亚 Wypych^[7] 的理论原理与 1980 年英国剑桥大学 Konrad^[3] 等的文章基本相同。前者从实验数据得出料栓是主动倒塌的 (active failure), 后者则认为是被动倒塌 (passive failure)。此外, Wypych 用一个二次方程代替了 Konrad 的三次方程。

3 篇论文的料栓前端轴向应力 σ_f 的表达式略有不同。Konrad^[3] 的论文中

$$\sigma_f = \rho_b \alpha U_s^2 / (1 - \alpha)$$

文献 [5] 中

$$\sigma_f = \alpha \rho_b U_s^2$$

二者相差 $(1 - \alpha)$ 的因子. 文献 [7] 中

$$\sigma_f = \rho_b U_s (U_p - U_s)$$

作者用 Konrad^[3] 的方法用主动倒塌 (active) 计算壁面侧压系数 K_w , 则所得的压损 Δp 值与文献 [5] 的计算结果很接近, 其误差在实验误差的范围以内. 作者认为最好的办法是不用理论计算 K_w , 而是用实测 K_w 值, 或者用实验数据反算 K_w 值, 这样可得到与实验结果符合的压力损失 Δp 的计算值.

在大多数情况下, 真实的料栓质点是充气床, Konrad^[3] 采用堆积床的欧根公式来计算, 与实验结果比较, 相对而言误差稍大. 文献 [7] 采用特殊的实验装置测量出系数 a 和 b , 计算结果和实验结果比较, 相对而言符合较好.

4 水平管料栓输送的数值模拟

日本 Tomita^[8] 对水平管料栓输送进行了数值模拟. 文献 [3, 5, 7] 在水平管压力损失的解析计算中都采用了“气液两相流动比拟”, 文献 [8] 采用特征线方法数值计算气体流动方程组.

4.1 气体流动方程组

假设等温气体的气体速度小于压力传播速度, 则气体运动方程中的非线性加速度项小于压力项并能够忽略. 气体的连续方程和运动方程如下

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_w}{r_h} \quad (22)$$

其中 u_g 是气体速度, ρ_g 是气体密度, p 是压力, τ_w 是壁面剪切应力, r_h 是水力 (Hydraulic) 平均深度, t 是时间, x 是管道的轴向坐标. 气体的绝热方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p}{\rho_g^k} \right) = 0$$

其中 k 为空气的比热比, $kp/\rho_g = a^2$, a 为声速

$$a = \sqrt{RT}$$

这里 R 是气体常数, T 是绝对温度.

图 6 是料栓流动模型. 这里 A 是横截面积, 下标 1 表示自由层的颗粒, 下标 2 表示沉积层的颗粒. 假设对一个给定的气流, 整个管线的沉积层高度 H 是一个常数, 沉积层和料栓二者的空隙率 ε 也是常数. 在料栓中气体方程分别在自由层和沉积层分开解. 对于一个给定管道横截面, 压力是常数, 假设

$$p = p_1 A_1 / (A_1 + \varepsilon A_2) + p_2 A_2 \varepsilon / (A_1 + \varepsilon A_2) \quad (23)$$

这里 p_1 是自由层的压力, p_2 是沉积层压力. 由气体流动连续方程可得料栓前后边的关系

$$A_1 (u_1 - U_p) + A_2 (u_2 - U_p) = A (u_p - U_p) \quad (24)$$

这里 U_p 是料栓速度, u_p 是料栓中的气体速度.

此外还假设料栓两端的压降可用欧根公式, 料栓的摩擦力只考虑料栓重量产生的摩擦力.

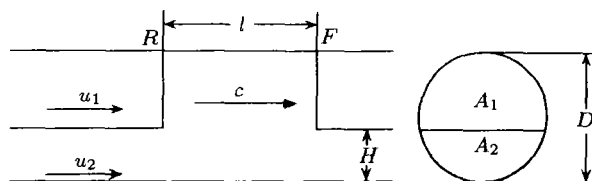


图 6 料栓流动模型

4.2 计算条件

计算条件如下: 管道直径 $D=42$ mm, 颗粒直径 $d=3.09$ mm, 颗粒的材料密度 $\rho_p = 920$ kg/m³, $T = 293$ K, $R = 287.1$ J/kgK, $\varepsilon = 0.35$, 料栓对管壁的摩擦系数 $f = 0.4$. 水平直管长 11.8 m, 计算中将管长分成 500 个计算网络. 计算中采用常数气体质量流率.

4.3 计算结果和结论

图 7 表示在管道入口处固体质量流率 G_s 和气体表面速度 U_i 之间的关系, 计算值和实验值符合较好. Tomita^[8] 认为他的计算方法能够预示料栓输送的特性, 能被用来检验料栓内的压力分布.

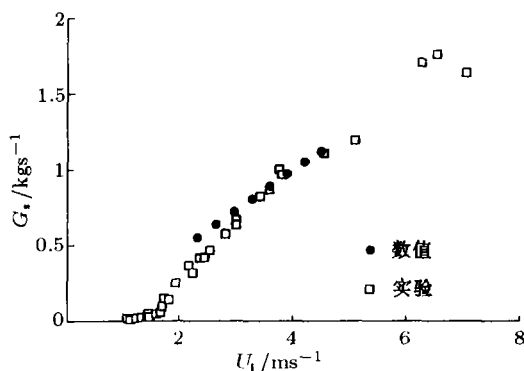


图 7 在管道入口处固体质量流率 G_s 和空气表面速度 U_i 之间的关系

5 倾斜管的压力损失

澳大利亚 Pan^[9] 和英国 Marjanovic 和 Mason^[10] 都研究了料栓在倾斜管中的输送问题, 本文仅介绍文献 [9].

5.1 理论分析

图 8 表示料栓在倾斜管道中向上输送时, 作用于料栓单元上的空气压力和应力. 由于管道倾斜料栓单元的重量 W 可分成二部分, 平行于管线的为 $W \sin \beta$, 垂直于管壁的为 $W \cos \beta$, 其中 β 为管道与水平线之间的夹角, 如图 8 所示. 因为料栓和管壁之间有摩擦, 有一个休止角, 故仍可以假设在倾斜管中两个邻近料栓之间有固定床 (Stationary bed). 因此, 在水平管中的压力损失和料栓速度的理论关系^[7] 可以应用到倾斜管中料栓的流动. 只是在计算料栓和管壁之间的摩擦力时, 料栓单元的重量是 $W \cos \beta$, 而不是 W .

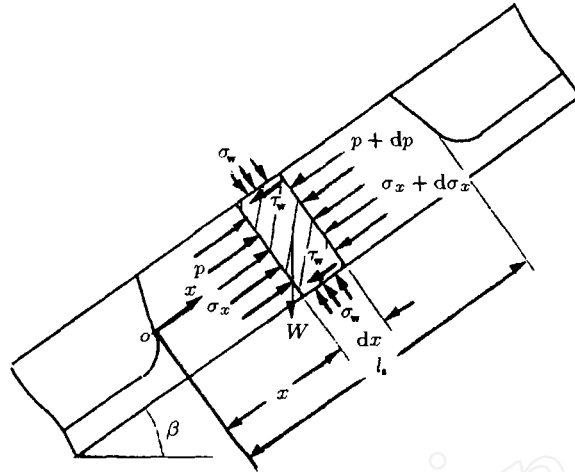


图 8 作用于倾斜料栓单元上的空气压力和应力

基于粉料力学原理^[7]可推导出,在倾斜管中运动的料栓二端的压力梯度为

$$\frac{\delta p}{l_s} = \frac{\delta p_1}{l_s} + \frac{\delta p_2}{l_s} + \frac{\delta p_3}{l_s} \quad (25)$$

$$\frac{\delta p_1}{l_s} = 2.168 \rho_b \mu_w K_w \sqrt{\frac{g}{D}} U_p - 1.175 K_w \rho_b g \mu_w \quad (26)$$

$$\frac{\delta p_2}{l_s} = 2 \rho_b g \mu_w \cos \beta \quad (27)$$

$$\frac{\delta p_3}{l_s} = \rho_b g \sin \beta \quad (28)$$

在(25)~(28)式的推导中应用了气液两相流动比拟,再应用文献[7]给出的特别实验装置来测定(11)式中的系数 a 和 b . 最后根据(18)~(20)式可得总压损失

$$\Delta p = (\delta p / l_s) L_s$$

5.2 压力损失达到最大值时的倾角

由(25)~(28)式可知,总压损失为

$$\Delta p = \frac{\delta p}{l_s} L_s = \left(\frac{\delta p_1}{l_s} + \frac{\delta p_2}{l_s} + \frac{\delta p_3}{l_s} \right) L_s \quad (29)$$

达到最大压力损失的条件是

$$\frac{d\Delta p}{d\beta} = 0$$

因此

$$\frac{d\Delta p}{d\beta} = \frac{d[(\delta p / l_s) L_s]}{d\beta} = \frac{d(\delta p / l_s)}{d\beta} L_s + \frac{\delta p}{l_s} \frac{dL_s}{d\beta} \quad (30)$$

将(26)~(28)式代入(30)式得

$$2.168 \rho_b \mu_w K_w \sqrt{\frac{g}{D}} \frac{dU_p}{d\beta} - 2 \rho_b g \mu_w \sin \beta + \rho_b g \cos \beta + \frac{\delta p}{l_s} \frac{dL_s}{d\beta} = 0 \quad (31)$$

因为空气是可压缩的以及压力损失是管线倾角的函数,料栓速度和料栓长度也是管线倾角的函数.文献[9]的实验结果表明管线倾角对料栓速度的影响不显著可以忽略.因此可以假设

$$\frac{dU_p}{d\beta} = 0$$

总的料栓长度是料栓速度的函数 (见 (18) 式). 因此也可假设

$$\frac{dL_s}{d\beta} = 0$$

考虑这些假设, (31) 式简化为

$$-2\rho_b g \mu_w \sin \beta + \rho_b g \cos \beta = 0$$

所以压力损失达到最大值时的倾角为

$$\beta_{\max} = \arctan(1/2\mu_w) \quad (32)$$

6 料栓的长距离输送

Pan^[11] 研究了料栓的长距离输送, 并进行相应的实验.

6.1 低速料栓流动

图 9 表示颗粒料气力输送的特征和流动模型. 在稀相 (高的空气速度), 颗粒均匀地分布在管道横截面 (图 9 中①). 当空气质量流率减小时, 颗粒沿管道底部输送 (图 9 中②). 当空气质量流率在边界 2 和 3 之间时, 沿管线产生料栓和高压波动以及管线振动 (图 9 中③). 如果空气质量流率减少到边界 2 的左边, 颗粒组成料栓平稳地在管道中流动 (图 9 中④). 当空气质量流率减少到边界 1 的左边, 空气速度不够高, 推不动料栓 (特别是在供料点), 管道发生阻塞. 仅当控制空气速度在边界 1 和 2 之间时, 才能达到低速料栓流动. 边界 1 代表需要起动料栓的最小空气速度. 边界 2 代表组成料栓的最大空气速度, 超过边界 2 料栓将被破坏, 产生不稳定流动.

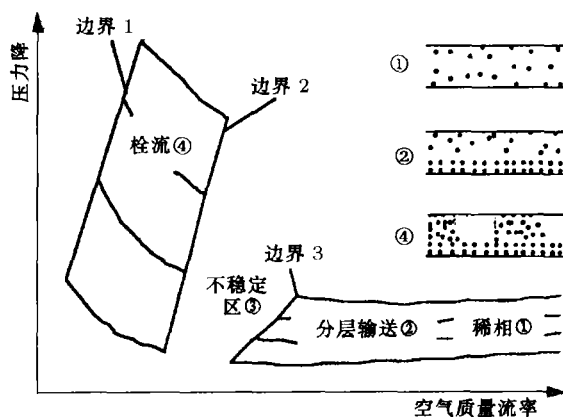


图 9 颗粒料气力输送的特征和流动模型

6.2 台阶管线

低速料栓在管道中流动时压力会降低. 空气是可压缩的, 所以在管道末端空气速度会增加. 沿管线的压降通常是管道的直径和长度, 物料性质, 物料和空气的质量流率等的函数. 因此, 边界 1 和 2 之间的宽度也是这些参数的函数. 对于给定的管道直径, 物料性质, 物料质量流率, 管线愈长, 边界 1 和 2 之间的宽度愈狭. 因此, 当管线超过某一长度, 则供料点阻塞或在管线下游产生料栓, 不稳定流动, 稀相流动, 见图 10.

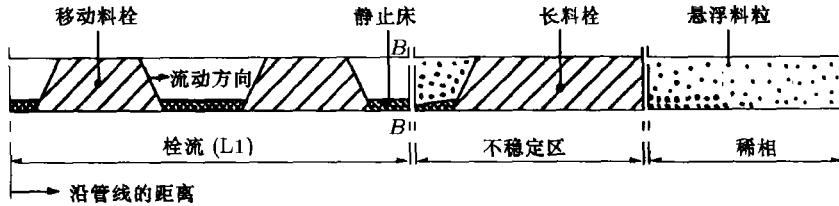


图 10 沿等直径管线的流动模型

图 10 表明料栓的最大输送距离为 L_1 。如要增加料栓的输送距离，必须降低 B 点以后的空气速度，使它小于图 9 中边界 2 的值。降低空气速度的有效方法通常是增加 B 点的管道直径。将等直径的管线改变成台阶管线，见图 11，则可增长料栓的输送距离。

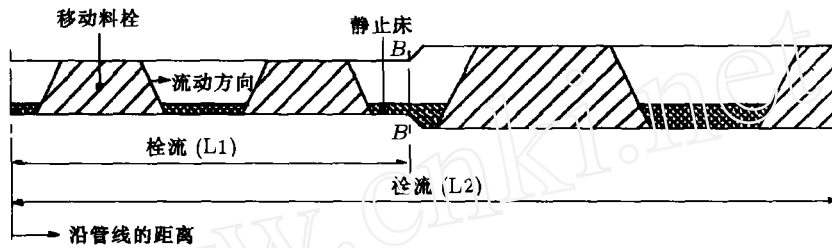


图 11 沿台阶管线的流动模型

6.3 实验

实验装置如下安排：位于管线末端的回收筒仓安置在供料漏斗之上。因此，在不同输送条件的实验中，物料可以循环运行。供料斗和回收仓都安装称重单元，可得到通过管线的物料质量流率。等直径管线和台阶管线的水平管 1、垂直管、水平管 2 的管长分别列于表 2。

表 2 管线数据

管型	直径 / mm	总长 / m	水平管 1/m	垂直 /m	水平管 2/m	弯头数
等直径	105	83.1	4	6.5	72.6	10
台阶	105/154	83.1	4	6.5	43/29.6	11

实验在空气质量流率很宽的范围进行。因此，边界 1 和 2 的位置可由实验确定。表 3 列出等直径管线和台阶管线的边界 1 和 2 的实验结果。表 3 中的下标 1 和 2 分别代表在边界 1 和 2 的实验结果， M_s 为物料质量流率， m 为空气质量流率， Δp 为压力损失， Δm 为空气质量流率范围（即边界 1 和 2 之间的宽度） $\Delta m = m_2 - m_1$ 。实验材料是用了白塑料丸和 Parrot mix 二种颗粒料。

从表 3 可明显的看出：台阶管线的空气质量流率范围 Δm 比等直径管线的大。如上面 6.2 节所述：对于给定的管道直径，物料性质和物料质量流率，空气质量流率范围 Δm 反比于管线长度。因此，从上面的实验结果可知：使用台阶管线可以增加料栓流动的输送距离。

6.4 结论

在台阶管线中成功地进行了低速料栓流动气力输送实验。实验验证了台阶管线可以增加料栓流动的输送距离。

7 其他

法国 Laouar 和 Molodtsov^[12] 实验研究了密相气力输送在很低速度下压力降的特征。英国

表 3 边界 1 和 2 的实验结果

	白塑料丸		Parrot mix	
	等直径管线	台阶管线	等直径管线	台阶管线
M_s/kgs^{-1}	1.06	0.86	0.82	0.82
	1.27	1.38	1.7	1.7
m_1/kgs^{-1}	0.064	0.061	0.065	0.063
	0.065	0.076	0.072	0.082
$\Delta p_1/\text{kPa}$	56	81	32	66
	70	86	68	100
m_2/kgs^{-1}	0.092	0.122	0.082	0.092
	0.105	0.131	0.85	0.12
$\Delta p_2/\text{kPa}$	49	52	27	55
	56	67	60	82
$\Delta m/\text{kgs}^{-1}$	0.028	0.061	0.017	0.029
	0.04	0.055	0.013	0.038

Taylor^[13] 实验研究了尺寸和输送性能很大不同的原材料在气力输送中的能量耗散比。为了增加设计的灵活性和需要多于一个压力降相互关系式, 英国 Mason, Marjanovic 和 Levy^[14] 给出了气力输送系统的模拟系统。斯洛伐克 Mierka 和 Timar^[15] 研究了气力输送的能量优化。以色列 Levig, Kogan 和 Kalman^[16] 模拟了料栓在垂直管中的气力输送。

8 展 望

物料的管道气力输送技术至今已有 100 多年的历史了。在早期的 80 多年里气力输送都是在物料全部悬浮的条件下进行的动压输送, 称之为稀相气力输送。由于这种输送方法能耗大、磨损大, 料粒易破碎等缺点, 80 年代初出现了密相静压气力输送的可行性研究。早期的实验装置其管道输送距离仅 5~7 m, 即短距离输送。英国剑桥大学的 Konrad 等的理论计算公式也是和这种实验装置的测量结果相比较。1994 年~1997 年澳大利亚的 Wypych 等的实验装置, 其管道输送距离为 80~100 多米, 即中距离输送。他在 Konrad 的理论基础之上, 采用半经验公式加以改进, 以适用于中距离输送。

随着栓状流密相气力输送在短距离和中距离的工业应用获得成功。作者认为该领域的前沿课题为长距离的输送。2000 年澳大利亚的 R. Pan^[11] 对长距离的栓状流密相气力输送进行了实验研究。实验发现: 在长距离输送过程中或者进口料出现阻塞, 或者在管线下游出现长料栓, 不规则的料栓合并和分裂, 出现床层式运动等不稳定区域, 甚至出现稀相输送。

预料未来的理论研究将对 Pan^[11] 在长距离输送过程的实验中发现的现象进行理论分析。出现这种现象的物理力学原理, 以及如何保证料栓和气栓均匀间隔的稳态流动。作者认为 Pan^[11] 用较为简单的台阶管线不能完满的解决在长距离输送实验中出现的一系列复杂现象。应在原有基础上革新工艺。为了说明问题, 下面随意地, 很不成熟地例举。譬如: 采用接力的方法, 增加压缩空气站和发料罐; 在一定距离后, 引射有一定压力的空气进入管道等方法。

预料未来将会出现长距离的栓状流密相气力输送的新工艺。

参 考 文 献

- 1 戈威尔 G W, 阿济兹 K 著. 复杂混合物在管道中的流动. 权忠舆译. 北京: 石油工业出版社, 1986
- 2 黄标. 气力输送. 上海: 上海科学技术出版社, 1984

- 3 Konrad K, Harrison D, Nedderman R M, Davidson J F. Prediction of the pressure drop for horizontal dense phase pneumatic conveying of particles, *Pneumotransport* 5, paper E1, In: Fifth international conference on the pneumatic transport of solids in pipes, London, 1980-04-16~18. UK: BHRA Fluid Engineering, 1980. 225~244
- 4 马家欢, 谷笳华, 潘文欣, 陈素贞. 粒子在水平管道中的栓柱状流. 见: 第三届全国多相流, 非牛顿流, 物理化学流学术会议论文集, 1990-11-17~20, 杭州: 浙江大学, 1990. 66~67
- 5 Mi B, Wypych P W. Pressure drop prediction in low-velocity pneumatic conveying. *Powder Technology*, 1994, 18: 125~137
- 6 Pan R, Wypych P W. Pressure drop prediction in single-slug pneumatic conveying. *Powder Handling & Processing*, 1995, 7: 63~68
- 7 Pan P, Wypych P W. Pressure drop and slug velocity in low-velocity pneumatic conveying of bulk solids. *Powder Technology*, 1997, 94: 123~132
- 8 Tomita Y, Tateishi K. Pneumatic slug conveying in a horizontal pipeline. *Powder Thchnology*, 1997, 94: 229~233
- 9 Pan R. Low-velocity slug-flow pneumatic conveying in inclined pipeline. *Powder Handling & Processing*, 1999, 11: 201~205
- 10 Marjanovic P, Mason D J. Gas solids flow in an inclined pipeline. *Powder Handling & Processing*, 1997, 9: 217~220
- 11 Pan R. Long distance slug-flow pneumatic conveying. *Powder Handling & Processing*, 2000, 12: 365~369
- 12 Laouar S, Molodtsov Y. Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity. *Powder Technology*, 1998, 95: 165~173
- 13 Taylor T. Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying. *Powder Technology*, 1998, 95: 1~6
- 14 Mason D J, Marjanovic P, Levy A. A simulation system for pneumatic conveying systems. *Powder Technology*, 1998, 95: 7~14
- 15 Mierka O, Timar P. Energetic optimisation of pneumatic transport. *Powder Handling & Processing*, 1997, 9: 221~225
- 16 Levy A, Kogan E, Kalman H. Simulation of air permeation through a moving plug in a vertical pipe. *Powder Technology*, 1998, 98: 209~216

PLUG-FLOW DENSE PHASE PNEUMATIC CONVEYING

Fan Chun

State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics(LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080, China

Abstract The experimental equipment of pneumatic conveying is introduced. The pressure drop prediction in horizontal plug-flow pneumatic conveying is reviewed. The calculations of pressure drop used three different method are carrying out and are compared with experimental data. Numerical simulation using the methods of characteristics in a horizontal pipeline, the pressure drop in inclined pipeline, and the long distance plug-flow pneumatic conveying are reviewed. Finally, the development trends of this subject are discussed.

Keywords plug-flow, dense phase pneumatic conveying, pressure drop, particle slug, slug velocity