

低速栓流气力输送压降的预测

吴 晓¹, 潘仁湖²

(1. 莆田学院 机电技术研究所, 福建 莆田 351100;
2. 澳大利亚沃伦冈大学 机械工程系, 澳大利亚 悉尼 2522)

摘 要: 提出一种新的测量料栓参数的实验方法, 并推导了用于低速栓流压降的计算公式, 该实验方法和计算公式能够较精确预测低速栓流气力输送的压降, 适用于规则、不规则及不同物理特性(如形状、密度和粒径分布)散料的栓流气力输送。实验证明, 该方法所预测的结果能够指导设计和现场操作。

关键词: 气力输送; 预测; 栓流; 压降

中图分类号: TP 271.32; TQ 022.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)06-0033-05

Prediction of Pressure Drop in Low-Velocity Slug-Flow Pneumatic Conveying

Wu Xiao¹, Pan Renhu²

(1. Centre for Mechanical Engineering, University of Putian, Putian Fujian 351100, China;
2. Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, Australia NSW, 2522)

Abstract: Equations used to predict pressure drop in low-velocity slug-flow are derived and a new experimental method is presented to measure the properties of slug (actually an aerated material bed). Based on the measured properties, the derived equations can predict pressure drop in low-velocity slug-flow pneumatic conveying accurately. The equations and method can be applied to bulk solid materials with regular, irregular and/or unusual physical properties (e.g. different shape, density and size distribution), as long as they are good candidates for this mode of pneumatic conveying. Experiments show that the results predicted by this method can guide the design and field operation.

Keywords: pneumatic conveying; predict; slug flow; pressure drop

0 引言

在工业化生产过程中, 大量的散料以流化床的模式进行储运和输送, 其中较为典型的是低速栓流气力输送。低速栓流气力输送因其低能耗, 无颗粒破损和管道磨损小而得到了广泛应用, 特别是在化学工业和食品工业等领域应用广泛。低速栓流气力输送模式中, 散料以料栓的形式输送, 且散料颗粒在栓内相对运动较少^[1-4]。

当料栓沿水平管道移动时, 该料栓铲起前面的颗粒, 同时掉下料栓的一些颗粒脱落在后面, 呈波浪式

前进。由于料栓受水平管道径向力和自身重力的共同作用, 为了克服这些力产生的摩擦力, 管道产生了压降。基于料栓与管道间的摩擦机理, 笔者设计并制造了一简便的测试筒实验装置: 在测试筒内填充散料, 并在测试筒两端加上多孔板形成料栓。通过调整上、下多孔板的间距, 可形成长短不一的料栓, 在测试筒中的料栓可水平放置、垂直放置或其它任意角度放置。当料栓铅垂放置时, 可加载不同砝码在料栓的顶部, 调整测试筒底部的进气流量并上移料栓, 即可测得压力梯度与轴向力的关系。当料栓水平放置时, 压降主要用来克服因料栓重力产生的摩擦力。试验中把

收稿日期: 2009-09-29

基金项目: 福建省教育厅科技计划基金资助项目(JB07154)

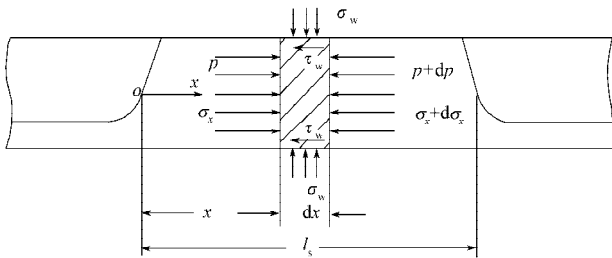
作者简介: 吴 晓(1964-), 男, 江苏徐州人, 莆田学院副教授, 硕士, 主要从事气力输送方面的教学与研究,

E-mail: wuxiao186@163.com

白塑料颗粒用作测试材料, 测量了料栓的参数(压力梯度与轴向力、由料栓重量产生的摩擦力等), 并预测了实际工业规模的白塑料颗粒栓流输送现场的压降。通过比较压降的预测值与实际工业中的实测值, 结果相差较少, 符合设计要求。

1 基本原理

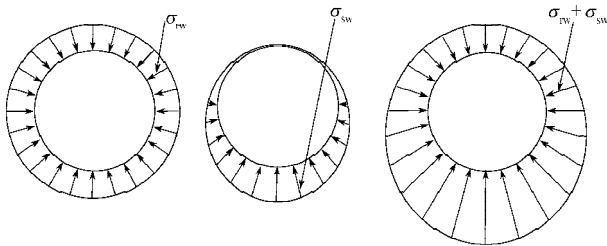
一般而言, 低速栓流气力输送是密度小和自由流动的颗粒散料, 如塑料粒、奶粉等。当散料以料栓的模式输送时, 散料间没有相对运动。图1为料栓单元在水平管道中的受力示意^[1-4]。



l_s- 单栓长度; σ_w- 总正壁应力; τ_w- 管壁上的剪应力; σ_x- 管壁反作用于散料的轴向压应力; x- 横坐标; p- 空气压力

图1 料栓单元在水平管道中的受力示意图
Fig. 1 Air pressure and stresses acting on a horizontal particle slug

图2为料栓管壁的断面受力情况示意图, 其中σ_{rw}是径向应力, σ_{sw}是重力引起的应力, 联合作用后的正壁压应力为σ_{rw}+σ_{sw}。



a) 径向应力σ_{rw} b) 重力引起的应力σ_{sw} c) 正壁应力σ_{rw}+σ_{sw}

图2 管壁断面受力示意图

Fig. 2 Diagram of cross-section stresses acting on the pipe wall

图3为求解σ_{sw}示意, 由图3可知, 由散料重力引起的应力通过平衡计算得: σ_{sw}=k_hρ_bg(1+cosθ)R, 而径向应力σ_{rw}=k_wσ_x。式中:

- σ_{sw} 为散料重力产生的正壁应力, 单位为 Pa;
- ρ_b 为散料堆积密度, 单位为 kg·m⁻³;
- g 为重力加速度, 取 9.81 m·s⁻²;
- θ 为正壁压力角, 单位为 °;
- R 为管内半径, 单位为 m;

k_h 是料栓质量传递系数;

σ_{rw} 为管壁反作用于散料的径向正应力, 单位为 Pa;

k_w 是应力传递系数, 即径向应力与轴向应力之比;

σ_x 为管壁反作用于散料的轴向压应力, 单位为 Pa。

由图3可以看出, k_w为常数, 而k_h沿管道断面圆周变化。

如散料服从 Coulomb 失效定律^[1], 则:

$$\tau_w = \mu_w \sigma_w + c_w = \mu_w [k_w \sigma_x + k_h \rho_b g (1 + \cos \theta)] + c_w \quad (1)$$

当移动料栓达到稳定状态时, 其差压推动力与管道阻力平衡。假设轴向力与径向力只与 x 相关, 且散料无粘性, 即 c_w=0; 当 dx 上的力相互平衡时, 可得到:

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

式中 A 为管断面积, 单位为 m²。将式(1)代入式(2)得:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{4\mu_w k_w}{D} \sigma_x + \frac{\rho_b g \mu_w k_{hh}}{\pi} = 0 \quad (3)$$

式中:

μ_w 为管壁摩擦系数, 且 μ_w=tan φ_w, 其中 φ_w 为管壁摩擦角;

D 为管道内径, 单位为 m;

k_{hh} 为 k_h 围绕管线周长的积分, 且

$$k_{hh} = \int_0^{2\pi} k_h (1 + \cos \theta) d\theta$$

对于确定的散料和管材, 式(3)中的参数 μ_w、k_w、ρ_b 和 k_{hh} 均为常数, 也就是说只要采用平均输送条件^[5](基于平均空气密度), 压力梯度(δ_p=dp/dx)可认为不变。对式(3)求解得:

$$\sigma_x = c \exp\left(-\frac{2\mu_w k_w}{R} x\right) + \left(-\frac{\rho_b g \mu_w k_{hh}}{\pi} + \delta_{pm}\right) \frac{D}{4\mu_w k_w}$$

式中:

δ_{pm} 为栓内压力梯度, 单位为 Pa·m⁻¹;

c 是积分常数, 可通过以下边界条件求出,

σ_x = σ_f, 当 x = l_s;

σ_x = σ_b, 当 x = 0。

其中: σ_f 为前端面上的应力, 单位为 Pa;

σ_b 为后端面上的应力, 单位为 Pa。

运用上述边界条件时, 假设 l_s ≫ D, 这对于大部分栓流系统是合理的。确定单个水平料栓的压力梯度方

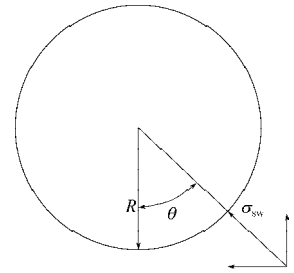


图3 求解σ_{sw}示意图
Fig. 3 Diagram of Solving σ_{sw}

程时, 采用下式计算:

$$\delta_{\rho_m} = \frac{4\mu_w k_w}{D} \sigma_f + \frac{\rho_b g \mu_w k_{hh}}{\pi}, \quad (4)$$

式(4)表明, 压力梯度是轴向力 σ_f 和由料栓质量产生的摩擦力的函数。

令 $B_1 = 4\mu_w k_w$ 、 $B_2 = \rho_b g \mu_w k_{hh} / \pi$, B_1 、 B_2 为常数,

$$\text{得: } \delta_{\rho_m} = B_1 \frac{\sigma_f}{D} + B_2. \quad (5)$$

对于确定的散料与管材, B_1 、 B_2 也是常数, 而式(4)、(5)中的 σ_f 是由静止床粒子团产生的, 根据能量守恒定律, 可得 σ_f 值为^[3-4]:

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

式中:

U_p 是栓流速度, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

U_s 是栓流内颗粒的平均速度, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据气、液方法类比, U_p 和 U_s 之间的关系为:

$$U_p = U_s + 0.542\sqrt{gD}, \quad (7)$$

将式(6)代入式(7), 然后再代入式(5)可得:

$$\delta_{\rho_m} = 0.542\rho_b B_1 \sqrt{\frac{g}{D}} U_p - 0.294gB_1\rho_b + B_2. \quad (8)$$

式(8)中有2个未知变量 δ_{ρ_m} 和 U_p , 可用式(9)所示填充床模型^[5]求出这2个未知量:

$$\delta_{\rho_m} = aU_{sp} + b\rho_{im}U_{sp}^2, \quad (9)$$

式中:

ρ_{im} 为空气密度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

$$U_{sp} \text{ 是滑移速度, 且 } U_{sp} = U_a - U_p, \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得:

$$\delta_{\rho_m} = b\rho_{im}U_p^2 - (a + 2b\rho_{im}U_a)U_p + aU_a + b\rho_{im}U_a^2. \quad (11)$$

式中:

a 、 b 为填充床常数, 且 a 与散料粘性成正比, b 与粒径空隙率有关;

U_a 为操作气速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

公式(11)只适用于无粘性的散料^[6-7]。因此, 利用式(8)、(11), 可求出无粘性散料的 δ_{ρ_m} 和 U_p :

$$A_1 U_p^2 + A_2 U_p + A_3 = 0.$$

式中:

$$A_1 = b\rho_{im};$$

$$A_2 = -\left(a + 2b\rho_{im}U_a + 0.542\rho_b B_1 \sqrt{\frac{g}{D}}\right);$$

$$A_3 = aU_a + b\rho_{im}U_a^2 + 0.294gB_1\rho_b - B_2.$$

因为 $U_a - U_p > 0$, 所以 $U_p = \frac{-A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1}$. (12)

将式(12)代入式(8)或式(11)中, 可求出压力梯度 δ_{ρ_m} 。料栓长度已知时, 即可求出整个料栓的压降。

低速栓流气力输送系统通常沿输送管线有几个料栓, B. Mi 和 P.W. Wypych^[2]在研究中发现: 只要采用平均输送条件(即采用平均空气密度), 所有料栓产生压降之和等于总长度为管道所有小料栓长度之和的那个料栓压降。

低速栓流气力管道中总的料栓长度 L_s 为:

$$L_s = \frac{m_s L}{A(1-\alpha)\rho_b U_p},$$

式中: L 为水平输送管道总长, 单位为 m ; α 为静止床的断面面积 A_{st} 与管道的断面面积 A 之比, 即

$$\alpha = \frac{A_{st}}{A} = \frac{0.542\sqrt{gD}}{U_p}.$$

因此, 总的压降 Δp 为: $\Delta p = \delta_{\rho_m} L_s$. (13)

2 试验设计

2.1 试验台

式(5)表明压力梯度用于克服料栓质量和轴向摩擦阻力, B_1 表明压力梯度与轴向摩擦力的关系, B_2 是压力梯度与料栓质量间关系。从式(8)、(11)可看出, 压降和栓速在 B_1 、 B_2 、 a 和 b 确定之后是可以预测的。基于式(5)、(9)建立如图4所示的简易测试筒。

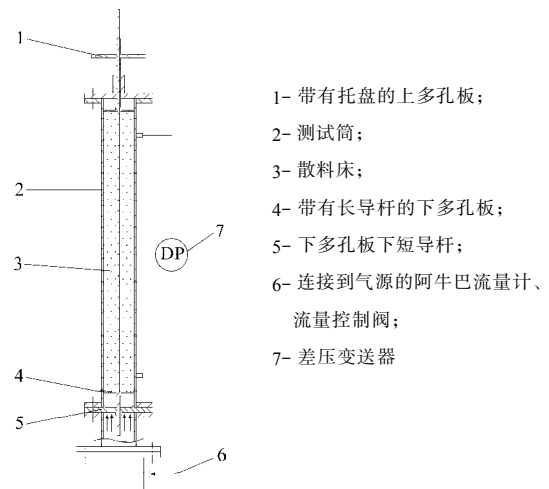


图4 测试筒示意图

Fig. 4 Schematic layout of test chamber

测试筒的内径为105 mm, 总的筒腔高度1 300 mm, 在2个多孔板间形成料栓, 2个多孔板由1长杆连接, 但只有上面1个多孔板可移动。下面的多孔板及长杆均固定在测试筒内, 改变下面多孔板的位置可得不同长度的料栓, 上面的多孔板有导轨, 在运动时避免与测试筒壁接触, 另, 所有的导销及密封材料都由聚四氟乙烯组成, 可减小摩擦阻力。

上多孔板被安装了1个托盘, 当测试筒铅垂放置时, 可加载不同质量的砝码去仿真不同的 σ_f 。当给定1 040 mm的料栓, 通过固定在下圆盘的差压计测量压

降后,可求得料栓的压力梯度。空气的质量流量由带有孔板的流量计监测。

通过带有数据采集软件的计算机,对空气质量流量及压力变送器的数据进行采集,且测试仪器均在测试之前进行了校准。

当测试筒铅垂放置时,每次试验时把不同砝码放入托盘,然后计算机程序自动开始记录数据,并打开通气阀,手动操作调节阀增加空气量,直到料栓开始向上移动。移动开始后,气流不断地向上推动料栓约40 mm。测试完成后,关闭阀门,计算机程序停止,且上多孔板返回起点,保存数据并分析测量值。设定不同长度的料栓,重复上面的试验。当测试筒水平放置时,除托盘空着外,其余条件与铅垂测量过程相同。

2.2 试验材料

白塑料颗粒是低速栓流气力输送试验的最好散料,其物理特性是 $\rho_s=834 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_b=578 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $d_p=4100 \mu\text{m}$ (粒径); $\phi=44^\circ$, $\phi_w=12^\circ$ 。

2.3 试验结果与分析

白塑料颗粒被填充到测试筒之后,形成930 mm的料栓。分别进行测试筒水平和铅垂的测试试验,表1是当测试筒铅垂时的测试结果,表中 m_f 是空气的质量流量, p_1 是下多孔板的压力, δ_{p_m} 是料栓的压力梯度, w 是放在料栓顶部托盘内砝码的质量, σ_f 是料栓顶部应力($\sigma_f=w/A$), U_a 是操作气速(基于平均空气密度)。

为了确定水平栓流的 B_1 ,通过比较 $\delta_{p_m} - \rho_b g \cdot \sigma_f / D$ 结果,得出 B_1 等于0.696(我们能够比较不同长度料栓

的 B_1 值)。

表1 测试筒铅垂时白塑料颗粒的测试结果

Table 1 Test results for white plastic pellets when the chamber was vertical

| 试验次数 | $m_f / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ | p_1 / kPa | $\delta_{p_m} / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$ | w / kg | $\delta_{p_m} - \rho_b g / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$ | σ_f / kPa | $U_a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|------|---|--------------------|---|-----------------|--|-------------------------|--|
| 1 | 0.012 83 | 12.40 | 13.06 | 0.72 | 7.40 | 0.82 | 1.162 |
| 2 | 0.019 95 | 26.45 | 26.20 | 2.72 | 20.54 | 3.09 | 1.682 |
| 3 | 0.026 58 | 40.02 | 40.64 | 5.72 | 34.98 | 6.48 | 2.117 |
| 4 | 0.036 89 | 66.52 | 67.97 | 8.72 | 62.31 | 9.88 | 2.638 |
| 5 | 0.039 60 | 74.56 | 75.29 | 10.72 | 69.63 | 12.15 | 2.738 |
| 6 | 0.044 47 | 91.67 | 88.16 | 15.72 | 82.50 | 17.81 | 2.850 |

测试筒水平放置时,增加空气量直到料栓移动,得到的压力梯度为 $4638 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,即 $B_2=4638 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。故重写方程(9)得: $\frac{\delta p_m}{U_{sp}} = a + b \frac{m_f}{A}$ 。

因为在测试筒内的料栓是静止的,所以表1中 $U_{sp}=U_a$ 。操作气流速度 U_a (基于平均空气密度)可被确定^[8-11],因此,根据 δ_{p_m}/U_a 、 m_f/A 可确定 a 、 b 的值,分别为: $a=1382$ 、 $b=6495$ (我们也可比较不同长度料栓的 a 、 b 值)。

3 压降预测

在 B_1 、 B_2 、 a 和 b 值确定之后,就可以利用公式(8)、(9)来预测压降。表2列出了白塑料颗粒压降的实验值和预测值,工业试验输送管道长度为21.7 m,内径 D 为60.14 mm。

表2 白塑料颗粒压降的实验值和预测值

Table 2 Predicted and experimental pressure drop

| $\Delta p / \text{kPa}$ | 质 量 条 件 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
| | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s |
| | 0.027 8 | 0.396 | 0.025 1 | 0.395 | 0.022 6 | 0.389 | 0.020 1 | 0.399 | 0.019 9 | 0.399 | 0.030 9 | 0.750 | 0.030 7 | 0.726 |
| 实验值 | 17.96 | | 16.24 | | 15.90 | | 22.30 | | 23.45 | | 30.13 | | 29.98 | |
| 预测值 | 18.02 | | 18.50 | | 18.84 | | 20.19 | | 20.24 | | 33.75 | | 32.70 | |
| $\Delta p / \text{kPa}$ | 质 量 条 件 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | |
| | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | |
| | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s | m_f | m_s |
| | 0.025 2 | 0.689 | 0.026 0 | 0.656 | 0.025 6 | 0.526 | 0.026 6 | 0.512 | 0.034 0 | 0.710 | 0.020 6 | 0.366 | 0.025 3 | 0.494 |
| 实验值 | 30.20 | | 30.26 | | 25.23 | | 21.85 | | 26.57 | | 20.77 | | 22.94 | |
| 预测值 | 32.76 | | 30.86 | | 24.66 | | 23.73 | | 31.16 | | 18.28 | | 23.21 | |

表2的数据表明:基于第2节中的方程确定的料栓参数确定后,压降是可以准确预测的。因为由2个多孔板限定在测试筒内的料栓和它的特性参数(即压力梯度与轴向应力、重力引起的轴向摩擦力的关系)可直接测量,且不管试验材料是否规则。

本研究中实验结果与预测的比较情况如图5所示,其中 D_{pe} 表示实验值,单位为kPa; D_{pc} 表示预测值,单位为kPa。

从图5可看出预测效果较好。另外,由于系数 B_1 、 B_2 、 a 和 b 分别与散料密度、粒径等散料特性有关^[4],所以预测的方程式适合于一般散料输送,在实验室内只要选定了一定特性的散料,进行测试筒试验求出散料特性系数 B_1 、 B_2 、 a 和 b ,即可根据式(8)和(12)预测出实际输送系统的栓速和压降;此处仅以白塑料作为物料输送,而此后多次、多种散料预测实验比较中,均能很好地相符。

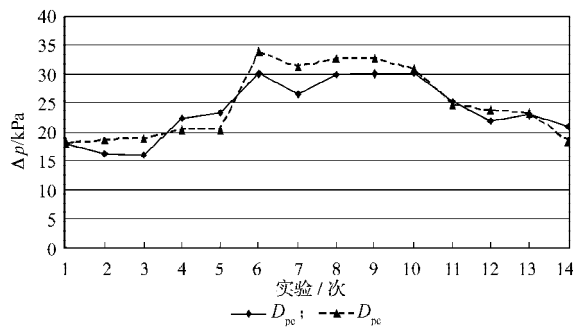


图5 实验与预测的曲线

Fig. 5 Experimental and predicted curves

4 结语

当散料以低速栓流输送时,在料栓散料间没有相对运动,沿水平管道输送的压降克服轴向摩擦阻力。基于料栓与管壁产生摩擦力的机理,设计并搭建了一个专门测试筒实验台,它既能铅垂又能水平放置,当铅垂放置时,可得到轴向应力与压力梯度的关系;当水平放置时,压力梯度用来克服由料栓质量引起的摩擦力。由测试筒测量到的料栓参数可直接用来预测现场低速栓流气力输送的管道压降,并可达到较高的预测精度。

本文提出的测量方法简单,预测结果准确。这种气力输送模型适用于规则、不规则及不同物理特性散料的栓流气力输送,实验证明,预测的结果能够指导设计和现场操作。

参考文献:

- [1] Sanchez L, Vasques N A, Klinzing G E, et al. Evaluation of Models and Correlations for Pressure Drop Estimation in Dense-Phase Pneumatic Conveying and Experimental Analysis [J]. Powder Technology, 2005, 153: 142-147.
- [2] Laín S, Sommerfeld M. Euler/Lagrange Computations of Pneumatic Conveying in A Horizontal Channel with Different Wall Roughness[J]. Powder Technology, 2008, 184(1): 76-88.
- [3] 吴晓. 气固两相流能耗特性的试验研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2009, 34(1): 78-81.
- [4] Pan Renhu, Peter W Wypych. A New Method for Determining Pressure Drop and Slug Velocity of Low Speed Slug Flow[J]. Pneumatic Transfer of Bulk Bimonthly, 2006, 70(1): 1-7.
- [5] 崔功龙. 燃煤发电厂粉煤灰气力输送系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 20-21
Cui Gonglong. Ash Pneumatic Conveying in Power Plant[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2005: 20-21.
- [6] 龚欣, 郭晓镭, 代正华, 等. 高固气比状态下的粉煤气力输送[J]. 化工学报, 2006, 57(3): 640-644.
Gong Xin, Guo Xiaolei, Dai Zhenghua, et al. High Solid Loading Pneumatic Conveying of Pulverized Coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 640-644.
- [7] Azzopardi B J, Jackson K, Robinson J P, et al. Fluctuations in Dense Phase Pneumatic Conveying of Pulverised Coal Measured Using Electrical Capacitance Tomography[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(9): 2548-2558.
- [8] Sanchez L, Vasquez N K, Linzing G E, et al. Characterization of Bulk Solids to Assess Dense Phase Pneumatic Conveying[J]. Powder Technology, 2003, 138: 93-117.
- [9] 林江, 楼建勇, 骆章. 正压浓相气力输送系统输送特性的实验研究[J]. 浙江科技学院学报, 2008, 20(2): 93-97.
Lin Jiang, Lou Jianyong, Luo Zhang. Experimental Study on the Conveying Characteristics of the Dense Pneumatic Conveying System[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2008, 20(2): 93-97.
- [10] Li J, Webb C, Pandiell S S, et al. Solids Deposition in Low-Velocity Slug Flow Pneumatic Conveying[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 167-173.
- [11] Yuji Tomita, Vijay Kumar Agarwal, Hiroyuki Asou, et al. Low-Velocity Pneumatic Conveying in Horizontal Pipe for Coarse Particles and Fine Powders[J]. Particology, 2008 (6): 316-321.

(责任编辑: 廖友媛)