

HDLDG-06 粉体流量计在提升管中的应用研究*

王芬芬 鄂承林 卢春喜

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室 北京 102249)

摘要: 在一套高约 18 m、内径为 $\phi 100$ mm 的提升管冷态实验装置上,根据容积法测量的颗粒循环量对 HDLDG-06 粉体流量计的测量准确性进行了研究。结果表明,粉体流量计的测量准确性与提升管颗粒循环强度大小间的关系不大,而与提升管截面平均颗粒浓度大小有直接关系。在截面平均颗粒浓度小于 6.9 kg/m^3 时,粉体流量计的测量准确性较好,在截面平均颗粒浓度大于 6.9 kg/m^3 时,粉体流量计的测量准确性较差。根据相关实验数据,建立了 HDLDG-06 粉体流量计在提升管中应用的校正关系式和适用条件。

关键词: 循环流化床;颗粒循环量;粉体流量计;容积法

中图分类号: TP216+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Application research on the measurement of HDLDG-06 flowmeter in riser

Wang Fenfen E Chenglin Lu Chunxi

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: On height of about 18 m and inner diameter of 100 mm of a cold riser experimental apparatus, the measurement accuracy of the HDLDG-06 powder flowmeter was studied based on the particle circulation measured by volumetric method. The results show that the measurement accuracy of the flowmeter has little relationship with the particle circulation strength in the riser, while it has direct relationship with the cross-sectional average concentration of the particle in the riser. When the sectional average concentration of the particle is less than 6.9 kg/m^3 , the powder flowmeter has quite a good measurement accuracy. While the sectional average concentration of the particle is more than 6.9 kg/m^3 , the powder flowmeter has quite a poor measurement accuracy. According to the experimental data, correction expression and its using condition is established for the HDLDG-06 powder flowmeter applied to the riser.

Keywords: circulating fluidized bed; particle circulation; HDLDG-06 powder flowmeter; volumetric method

1 引言

气固循环流化床技术在石油、化工、气化燃烧等工业领域获得广泛应用,国内外学者对循环流化床技术进行了大量研究^[1-5]。在循环流化床技术的实验研究中,固体颗粒循环量是研究中需要测量的一个重要操作参数,国内外学者对此研究了许多种测量仪器^[6-10]。针对此项参数,目前的研究普遍采用容积法对固体颗粒循环量进行测量^[11]。容积法是通过暂时关闭循环回路上的截止阀,根据截止阀上所堆积的物料体积来确定床内固体颗粒的循环量,其测量过程较复杂。

目前在气固流动系统中,固体颗粒的流量测量是一个技术难题,很多学者针对气力输送过程中颗粒流量的测量和监测做了大量研究,开发了一些用于测量固体颗粒流量的测量仪器,但用于流化床中固体颗粒流量测量的则还很

少。根据未来电子测量仪器行业发展^[12],需要新的测量仪器来满足不断改变的测量需求。一个准确测量颗粒流量的仪器可以使得测量操作过程更加简单,也更好地对整个实验装置循环强度进行控制。

HDLDG-06 粉体流量计测量是基于法拉第电磁感应定律和电荷感应原理,专为粉体流量在线测量的,目前还未见有关此粉体流量计在循环流化床系统中应用的相关报道。为此对 HDLDG-06 粉体流量计在循环流化床系统中对颗粒循环量的测量进行系统研究,找到一种可对循环流化床提升管内颗粒循环量进行简单、准确、可靠测量的在线测量方法,对循环流化床技术的研究和开发具有重要意义。

本研究在一套提升管冷态实验装置上进行系统研究,分别用容积法和 HDLDG-06 粉体流量计测定在提升管中的循环量,进行对比拟合。实验结果表明,在截面平均颗粒浓度小于 6.9 kg/m^3 时,粉体流量计的测量准确性较好;在

截面平均颗粒浓度大于 6.9 kg/m^3 时,粉体流量计的测量准确性较差。

2 实验装置及实验方法

2.1 实验装置

研究中采用的冷态提升管实验装置如图 1 所示。装置主要由提升管、HDLDG-06 粉体流量计、汽提段、预汽提段、沉降段、再生器及旋风分离器等组成。再生器 18 中的 FCC 颗粒经再生剂输送管 3 进入预提升段,在提升风的作用下进入内径为 100 mm 的提升管 4,提升气体和 FCC 颗粒进入提升管顶端的快分头 13 进行气固分离,分离下来的 FCC 颗粒经沉降段 10 后进入汽提段 8,再经汽提段上的待生剂输送管 6 送回再生器 18 中,完成 FCC 颗粒在再生器和提升管中的连续循环。未分离下来的少量 FCC 颗粒及提升气体进入沉降器顶旋 12 进行进一步气固分离,分离下来的少量 FCC 颗粒经沉降器顶旋下部的料腿 11 送回汽提段,提升气体则由沉降器顶旋上部排空。实验中,提升管中的提升风速 U_g 在 $6 \sim 18 \text{ m/s}$ 变化,提升管中的 FCC 颗粒循环强度 G_s 在 $20 \sim 220 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 变化,粉体流量计安装在距提升风管出口约 5 m 高的位置处。

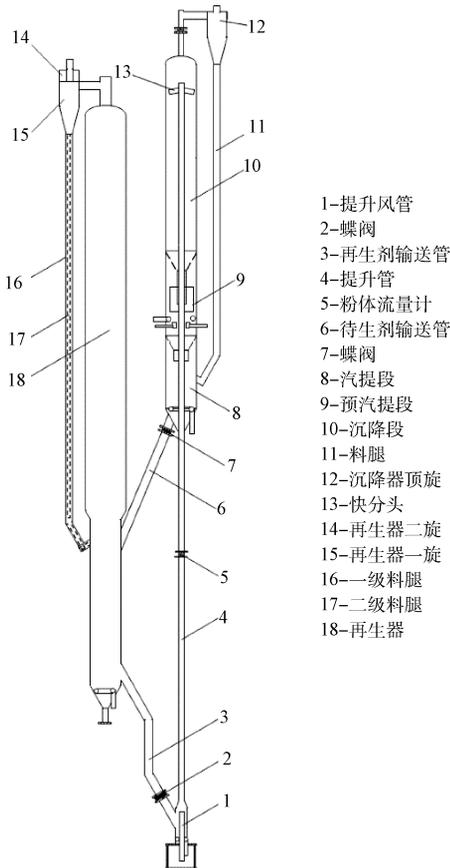


图 1 实验装置图

引进德国技术,成功开发出的专为粉体流量监测的一种新型在线式流量计,提供了目前世界最新交流耦合技术,是现代最精确和稳定的监测技术,特别适合连续排放记录和数数据累积。其工作原理是运用粉体颗粒流经环形传感器内侧,所产生的感应电荷 q 来确认粉体的床层截面颗粒浓度 C_p ,以及依据法拉第电磁感应定律感应出电动势 E 来确认粉体的平均速度 v ,然后两者乘积与截面积 A 之积而得到粉体的质量流量 Q 。

图 2 给出了 HDLDG-06 流量计的基本结构图,主要是由传感器和转换器两部分组成的。测量管内衬绝缘材料的非导磁合金短管,电极沿管径方向穿通管壁固定在测量管上,其电极与衬里内表面基本齐平。励磁线圈由双方波脉冲励磁时,将在与测量管轴线垂直的方向上产生一磁通量密度为 B 的工作磁场。此时,具有一定速度的粉体相对运动摩擦产生静电成为具有一定电导率的流体,粉体流经测量管,将切割磁感线感应出电动势 E ,电动势 E 正比于磁通量密度 B ,测量管内径 d 和平均流速 v 的乘积,电动势 E (流量信号)由电极检出并通过电缆送至转换器。转换器将流量信号放大处理后,可显示流体流量,并能输出脉冲,模拟电流等信号,用于流量的控制和调节。



图 2 HDLDG-06 粉体流量计

$$E = kBdv \quad (1)$$

式中: E 为电极间的信号电压, V ; B 为磁通密度, T ; d 为测量管内径, m ; v 为颗粒平均流速, m/s 。其中 k, d 为常数,由于励磁电流是恒流的,故 B 也是常数。

$$v = \frac{E}{kBv} \quad (2)$$

HDLDG-06 流量计采用最先进的环形防干扰传感器电荷感应技术,当带电粉体流经环形传感器时,感应探头将会感应出一定量的静电荷 q ,产生电流 I ,静电荷 q 越多,产生感应电流 I 越大,即 $I \propto q$ 。在颗粒处于分散状态时,截面颗粒浓度 C_p 与电流大小 I 成正比,即 $C_p \propto I$,故 $C_p \propto q$ 。

粉体质量流量:

$$Q = C_p AL / \Delta t = C_p Av \quad (3)$$

式中: Q 为质量流量, kg/s ; C_p 截面颗粒浓度, kg/m^3 ; A 为床层截面积, m^2 ; v 为颗粒速度, m/s 。

由式(1)可知,被测流体介质的温度、压力、电导率、固体颗粒介质的流固成分比等参数不会影响测量结果。固体颗粒流量的大小与截面颗粒浓度和流速成正比,截面颗粒

浓度越大和流速越快,产生的感应电压也就越高。经放大电路放大、整形、滤波、综合运算,然后输出与流量成线性的标准电流信号,供计数处理,最后换算成流量显示出来。由于测量管内无活动及阻流部件,因此几乎没有压力损失,并且有很高的可靠性。

2.2 实验介质

实验中采用 FCC 催化剂平衡剂为固体颗粒介质,其物性参数如表 1 所示。

表 1 FCC 颗粒物性

平均粒径 $d_p/\mu\text{m}$	堆积密度 $\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
67	843	1 500

2.3 实验方法

实验中分别采用容积法、HDLDG-06 粉体流量计测量颗粒在提升管中的循环量,其中容积法测量值作为实测值即提升管内颗粒的实际循环量,用于对 HDLDG-06 粉体流量计测量值进行对比研究和校正。

容积法对颗粒循环量的测量是通过关闭图 1 中待生剂输送管 6 上的蝶阀 7,计量再生器 18 中 FCC 颗粒单位下料高度 h 所需的时间 Δt ,按下式计算提升管内 FCC 颗粒的循环量 G_s 。

$$G_s = \frac{\rho_p h D_1^2}{\Delta t D_2^2} \quad (4)$$

式中: G_s 为提升管内的颗粒循环量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ρ_p 为再生器中的床层堆积密度, kg/m^3 ; h 为再生器中的颗粒单位下料高度, m ; D_1 为再生器内径, m ; D_2 为提升管内径, m 。

本次实验中根据再生器 18 中物料的下料高度来确定提升管内的颗粒循环量 G_s ,无需对旋风分离器 12 分离下来进入料腿 11 的颗粒量以及旋风分离器 12 未分离下来进入上部排空管的颗粒量进行计量,测量过程相对简单、准确。

3 结果分析与讨论

在整个循环流化床实验系统中,操作变量为提升风入口操作气速 U_g 和循环强度 G_s ,其中操作气速 U_g 分别为 6 m/s 、 10 m/s 、 14 m/s 、 18 m/s 。在每一种操作气速下,分别考察了几组循环强度条件下的容积法测量循环量值与流量计测量值的对比。以下实验结果中, G_{s1} 为流量计测量值, G_s 为容积法测量值,且 Q 为质量流量统称, G_s 亦为循环量统称,其中质量流量与截面积之商即为循环量。

$$G_s = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

3.1 容积法测量准确性

容积法测量值作为实验中极其重要的参数,其准确性是整个实验进行的充分条件。实验中可以通过在几种不同

循环条件下反复多次测量,考察其重复性,若多次测量值波动比较平稳,则说明容积法准确性高,测量值可靠。

图 3 为在同一种颗粒循环量 G_s 下,采用容积法重复 4 次测量的颗粒循环量随测量次数的波动曲线。

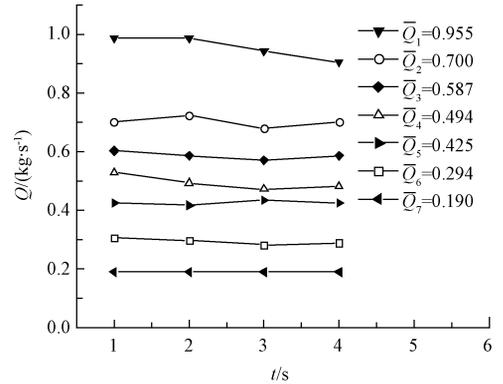


图 3 容积法测颗粒循环量随测量次数的变化曲线

实验中,在每一次测量时,均采用计量再生器 18 中催化剂床层下料高度 h 为 0.1 m 时所需要的时间变化量为 Δt ,则每次测量的颗粒循环量由式(6)计算。

$$Q = \frac{\rho_p \times A \times h}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: Q 为质量流量, kg/s ; ρ_p 为再生器中的床层堆积密度, kg/m^3 ; h 为再生器中的颗粒单位下料高度, m ; A 为床层截面积, m^2 。

由图 3 可见,在 6 种不同颗粒循环量下,采用容积法 4 次测量的颗粒循环量间均相差不大。其中选取图中颗粒平均循环量 $\bar{Q}_1 = 0.955 \text{ kg/s}$ 为例,其 4 次所测量的颗粒循环量与颗粒平均循环量 \bar{Q}_1 间的相对偏差如表 2 所示。

表 2 容积法测量值与平均值间的相对偏差

$Q/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{Q}_1/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	相对偏差/(%)
0.986	0.955	3.25
0.986	0.955	3.25
0.943	0.955	1.26
0.904	0.955	5.34

由表 2 可见,4 次测量的颗粒循环量与颗粒平均循环量 \bar{Q}_1 间的最大相对偏差为 5.34% ,最小相对偏差为 1.26% ,平均相对偏差为 3.28% ,说明本文采用容积法测量的颗粒循环量具有高准确性和可靠性,为验证粉体流量计测量准确性提供了重要保证。

3.2 粉体流量计的重复性研究

粉体流量计作为本实验的研究对象,其稳定性是仪器可以使用的充要条件,实验中通过在同一种颗粒循环量条件下,记录粉体流量计在不同采样时间测量的提升管中颗粒循环量随采样时间的波动曲线对粉体流量计的重复性和

稳定性进行考察。

图 4 为在 6 种颗粒循环量下,在 200 s 的总采样时间内,粉体流量计在不同采样时间测量的颗粒循环量随采样时间的波动曲线。由图 4 可见,在 6 种不同颗粒循环量时,粉体流量计在不同采样时间测量的颗粒循环量间均相差很小,其测量重复性很好。

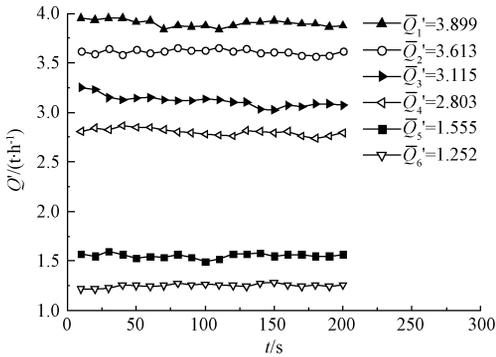


图 4 流量计测量颗粒循环量随采样时间的波动曲线

以图中粉体流量计测量的颗粒平均循环量 3.899 t/h 为例,其不同采样时间测量的颗粒循环量与颗粒平均循环量间的相对偏差如表 3 所示。

表 3 粉体流量计测量值与平均值相对偏差

$Q_i / t \cdot h^{-1}$	$\bar{Q}_i / t \cdot h^{-1}$	相关偏差 / (%)
3.950	3.899	1.308
3.934	3.899	0.898
3.950	3.899	1.308
3.950	3.899	1.308
3.910	3.899	0.282
3.926	3.899	0.692
3.839	3.899	1.539
3.878	3.899	0.539
3.864	3.899	0.898
3.878	3.899	0.539
3.839	3.899	1.539
3.878	3.899	0.539
3.910	3.899	0.282
3.910	3.899	0.282
3.926	3.899	0.692
3.910	3.899	0.282
3.894	3.899	0.128
3.894	3.899	0.128
3.863	3.899	0.923
3.878	3.899	0.539

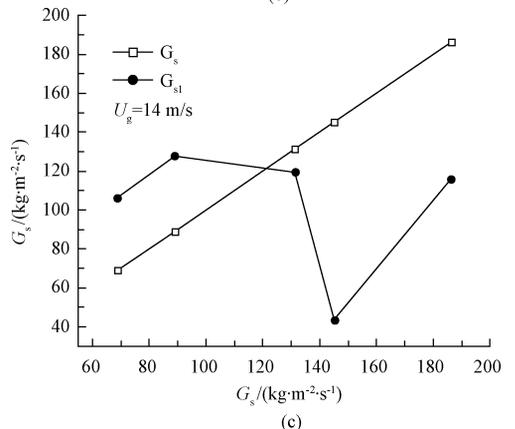
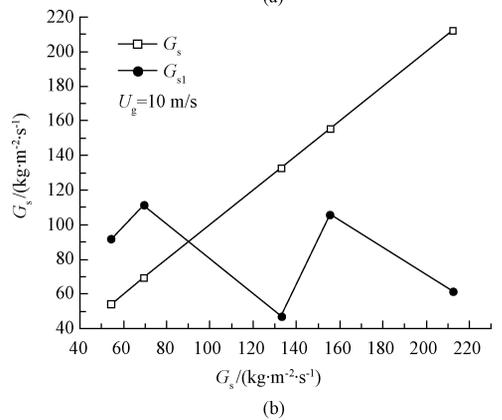
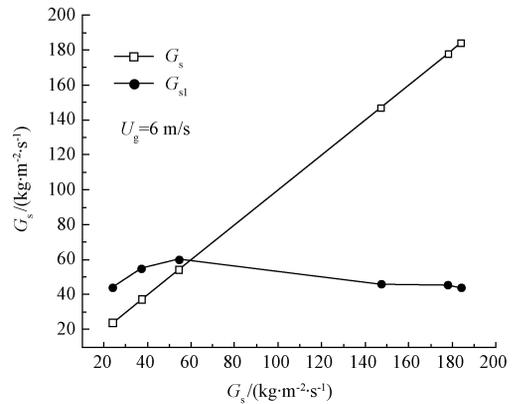
由表 3 可见,粉体流量计测量的颗粒循环量与平均循环量间的最大相对偏差为 1.54%,最小相对偏差为为

0.13%,平均相对偏差为为 0.73%。说明粉体流量计自身的测量重复性好、稳定性高。

3.3 粉体流量计的测量准确性

实验在内径为 $\phi 100$ mm 的提升管中,在提升风速分别为 6 m/s、10 m/s、14 m/s、18 m/s 四种操作气速下,均以容积法测量的几组不同颗粒循环强度 G_s 作为基准值对粉体流量计的测量准确性进行验证。

首先,根据实验测量结果,绘制在 4 种不同气速、不同颗粒循环量条件下的数据对比结果如图 5 所示,横坐标表示容积法测量所得到的提升管颗粒循环量 G_s ,纵坐标表示粉体流量计与容积法测量的颗粒循环量值,其中 G_{sl} 为粉体流量计测量的颗粒循环量强度, G_s 为容积法测量的颗粒循环强度, U_g 为提升风速。



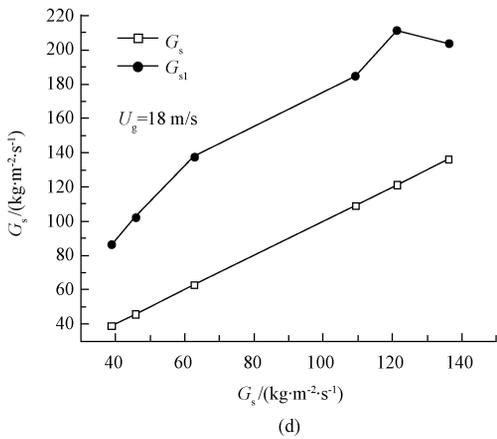


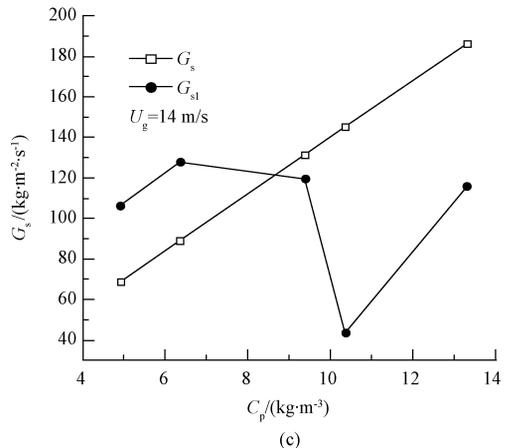
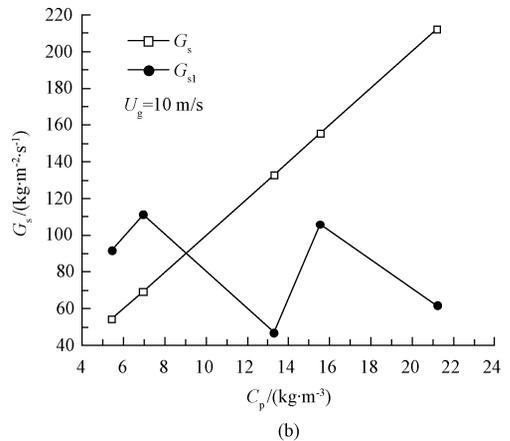
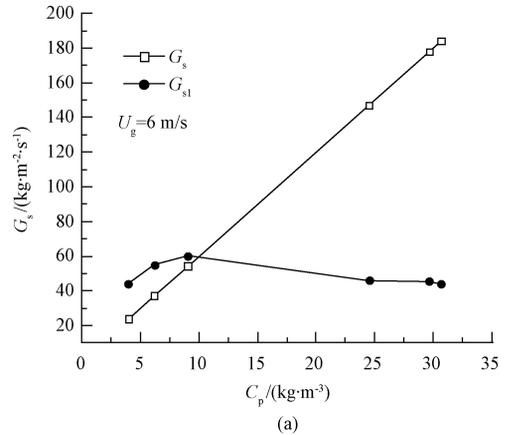
图5 4组相同风速不同循环量条件下容积法与粉体流量计测量值对比

由图5可见,在提升风速为6 m/s、提升管颗粒循环强度 G_s 为24~37 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,粉体流量计与容积法二者测量的颗粒循环强度虽然在数值上存在一些差别,粉体流量计测量的颗粒循环强度相对较大,但二者测量的颗粒循环强度却存在基本相同的变化趋势;在提升管颗粒循环强度超过37 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,二者测量的颗粒循环强度在数值和变化趋势上均存在很大差别,粉体流量计的测量值小于容积法测量值。在提升风速为10 m/s时,粉体流量计与容积法二者的测量值在提升管颗粒循环强度为54~69 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的变化趋势基本一致,仅在数值上存在一些差别;在提升管颗粒循环强度超过69 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,二者在测量值和变化趋势上均存在很大差别,且流量计测量值小于容积法测量值。在提升风速为14 m/s时,在颗粒循环强度为69~89 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,二者测量值的变化趋势基本一致,在颗粒循环强度超过89 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,二者测量值的变化趋势存在明显差别,且流量计测量值小于容积法测量值。在提升风速为18 m/s时,两者测量值在颗粒循环强度为39~121 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的变化趋势基本一致,在颗粒循环强度超过121 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的变化趋势相差较大。

上述实验结果表明,在4种不同提升风速下,均存在一临界颗粒循环强度。在小于该临界颗粒循环强度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度具有几乎相同的变化趋势,仅在数值上存在一些差别;在大于该临界颗粒循环强度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度在数值和变化趋势上均存在很大差别,并且该临界颗粒循环强度随着提升风速的增加而不断增加。在提升风速由6 m/s增加到18 m/s时,该临界颗粒循环强度由37 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到121 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,这表明颗粒循环强度的大小与粉体流量计测量准确性间的相互关系并不大,由连续性方程 $G_s = C_p \times U_p$ 可知,随着提升风速 U_g 的增加,提升管内颗粒速度 U_p 增加,在提升管截面平均颗粒浓度 C_p 相同的条件下,提升管颗粒循环强度 G_s 逐渐增加,这说

明也许粉体流量计的测量准确性与提升管截面平均颗粒浓度的大小有关,即存在一临界提升管截面平均颗粒浓度。在小于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度的变化趋势基本相同,粉体流量计的测量准确性较高;在大于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度在变化趋势上存在很大差别,粉体流量计的测量准确性很差。

图6中给出了在4种提升风速下,容积法和粉体流量计测量的颗粒循环强度随着提升管截面平均颗粒浓度 C_p 的变化曲线。



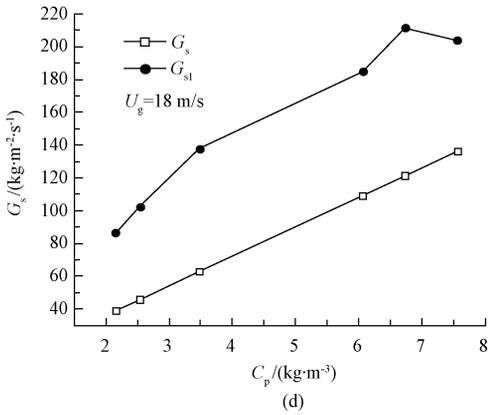


图 6 4 种风速下的 7 组循环量随着床层截面浓度变化曲线对比

由图 6 可知,在 4 种不同提升风速下,提升管内均存在一接近的临界截面平均颗粒浓度。在小于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度的变化趋势基本相同,仅数值上存在不同;在大于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度在数值和变化趋势上均存在很大差别。在提升风速分别为 6 m/s、10 m/s、14 m/s 和 18 m/s 时,该临界截面平均颗粒浓度分别为 6.2 kg/m³、6.9 kg/m³、6.4 kg/m³和 6.7 kg/m³。

总结图 5 和图 6,在循环流化床中,HDLDG-06 粉体流量计是否能够使用取决于截面平均颗粒浓度的大小。当截面平均颗粒浓度超过临界截面平均颗粒浓度,流量计测量误差大,且测量值均比准确值小,这可能是由两个原因造成。1) HDLDG-06 粉体流量计测床层截面颗粒浓度是由环形防干扰传感器电荷感应^[13-14]测定的。正常情况下,颗粒相互摩擦碰撞产生的静电荷由传感器检测出,转换为截面浓度信号。在相同风速下,当流化床内循环量较大时,可能风速不足以将颗粒分散开,导致颗粒在提升管边壁集聚,颗粒摩擦碰撞减弱带电颗粒间的电荷相互中和,加快了电荷的耗散速率,减少了电荷积累量,由传感器检测出的浓度信号减小,计算出的流量值减小。2) 在提升管中颗粒浓度分布呈中心稀边壁浓的环核结构^[11,15],边壁处颗粒上下滑落,颗粒切割磁感线相对速度减小,计算出的流量值减小。当截面平均颗粒浓度在不超过某个临界值时,流量计与容积法测量值相关性较好。因此,在截面平均颗粒浓度小于 6.9 kg/m³ 时,根据相关实验数据,建立了 HDLDG-06 粉体流量计在提升管中应用的校正关系式和适用条件。

拟合关系式为:

$$G_s^* = 0.579G_{sl} - 0.859 (0 < C_p \leq 6.9 \text{ kg/m}^3) \quad (7)$$

根据式(7)的计算值与容积法的测量值的比较如图 7 和表 4 所示。

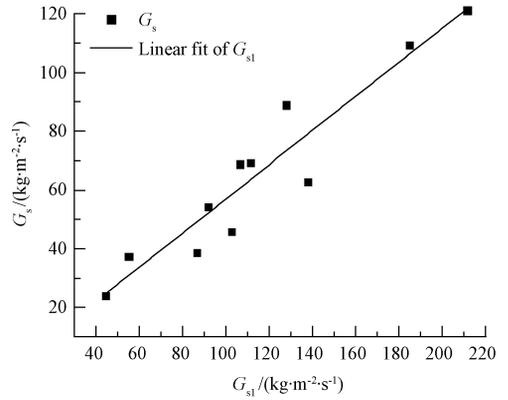


图 7 G_{sl} 拟合关系式

表 4 拟合式计算值与容积法测量值之间的误差计算

$G_s /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$G_s^* /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对偏差/ (%)
23.936	24.773	3.498
37.272	30.989	16.856
38.797	49.174	26.747
54.213	52.199	3.714
45.733	58.431	27.766
68.791	60.727	11.722
69.388	63.544	8.422
88.973	73.133	17.803
62.685	78.985	26.003
109.234	106.176	2.799
121.238	121.574	0.278

从表 4 可知,由拟合关系式计算值 G_{sl} 计算得到循环量 G_s^* 与由容积法测量得到的循环量值 G_s 最大偏差为 27.8%,最小偏差 0.3%,平均偏差 13.2%,测量结果在使用误差范围内。

3 结 论

在一套冷态提升管实验装置上根据容积法测量的颗粒循环量对 HDLDG-06 粉体流量计的测量准确性进行了系统研究,得到如下结论。

采用容积法测量的颗粒循环量具有较高的准确性和可靠性,采用的粉体流量计自身具有较高的重复性和稳定性。

在 4 种不同提升风速下,均存在一临界颗粒循环强度。在小于该临界颗粒循环强度时,粉体流量计的测量准确性较好;在大于该临界颗粒循环强度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度在数值和变化趋势上均存在很大差别。该临界颗粒循环强度随着提升风速的增加而不断增加,这表明颗粒循环强度的大小与粉体流量计测量准确性间的相关性不大。

粉体流量计测量准确性与提升管截面颗粒浓度间的相关性很好,在4种不同提升风速下,提升管内均存在一接近的临界截面平均颗粒浓度。在小于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度的变化趋势基本相同,仅数值上存在不同;在大于该临界截面平均颗粒浓度时,粉体流量计与容积法二者所测量的颗粒循环强度在数值和变化趋势上均存在很大差别。

可通过缩径增速从而减小截面颗粒浓度的方法来扩大粉体流量计的使用范围。

参考文献

- [1] 李洪钟,郭慕孙. 回眸与展望流态化科学与技术[J]. 化工学报,2013,64(1):52-62.
- [2] 张国杰,皮立强,杨兴灿,等. 超细粉在内循环流化床中的流态化特性[J]. 化学反应工程与工艺,2015,31(3):262-265.
- [3] 曾涛,张祥,黄卫星. 气固湍动流态化技术的研究进展[J]. 机械设计与制造,2010(7):262-263.
- [4] 董群,梅春林,张国甲,等. 流态化技术在催化裂化工艺中的应用进展[J]. 化学工业与工程技术,2010,31(1):27-31.
- [5] JESSU ZH. Circulating turbulent fluidization-A new fluidization regime or just a transitional phenomenon[J]. Particuology, 2010(8): 640-644.
- [6] 董群,王丽,任东海,等. 固体质量流量技术进展[J]. 化工进展,2010,29(增刊):1-4.
- [7] 杨道业,施源,徐锌锋. 基于双截面 ECT 的气/固两相流参数检测系统[J]. 仪器仪表学报,2013,34(9): 1968-1974.
- [8] 周宾,杨道业,许传龙,等. 静电粉体流量计的理论及实验研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9): 2007-2012.
- [9] 王丽. FCC 催化剂固体流量测量研究[D]. 大庆:东北石油大学,2011.
- [10] 石岩,侯其立,刘翠,等. 基于 DSP 的直管式科氏质量流量变送器研制[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(10):1130-1139.
- [11] 曹鑫,卢春喜,刘梦溪,等. 流化床提升管中脱油油砂颗粒固含率的轴向分布[J]. 过程工程学报,2013,13(5):766-770.
- [12] 崔建平. 电子测量仪器行业发展回顾与展望[J]. 国外电子测量技术,2014,33(1):1-4.
- [13] 赵恩彪,隋金军,王自亮,等. 基于外环状电荷感应原理的粉尘浓度测量[J]. 仪表技术与传感器,2010(6): 15-24.
- [14] 阚哲. 基于静电传感器气/固两相流参数测量方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [15] 严超宇,卢春喜. 气固环流燃烧器内颗粒流动行为[J]. 化工学报,2010,61(6):1354-1365.

作者简介

王芬芬,1990年出生,硕士研究生,研究方向为石油化工过程设备。

E-mail: lth0910@126.com