

正压浓相气力输送系统输送特性的实验研究

林 江¹,楼建勇²,骆 章³

(1 .浙江科技学院 轻工学院,杭州 310023;2 浙江工业大学 教育科学与技术学院,杭州 310014;
3 .诸暨市嘉成环境工程有限公司,浙江 诸暨 311800)

摘 要:对工业规模的正压浓相气力输送系统,在完全模拟实际工况的条件下,进行了固粒气力输送运行特征和操作参数的试验研究。对输送距离为 200 m 的正压浓相气力输送运行特性作了比较全面的定量描述和分析,试验结果揭示了气力输送的运行效率及其与输送参数的关系;澄清了某些工程中的提法;获得了最佳的运行工况点。所得结论可成为系统运行和新装置设计时主要参数的确定依据。

关键词:气力管道;运行参数;工业试验;输送特性

中图分类号:TH232 文献标识码:A 文章编号:1671-8798(2008)02-0093-05

Experimental study on the conveying characteristics of the dense pneumatic conveying system

LIN Jiang¹, LOU Jian-yong², LUO Zhang³

(1 . School of Light Industry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2 . College of Educational Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
3 . Zhuji Jiacheng Environment Engineering CO .,LTD, Zhuji 311800, China)

Abstract: Based on the industrial scale pneumatic conveying, the conveying characters and operating parameters are carried out . The conveying characters and operating parameters of dense pneumatic conveying system that the distance is 200m are fully described and analyzed . The conveying efficiency between operating parameters are studied . A statement in engineering is cleared . The operating parameters optimized are obtained in the pilot experiment . The conclusions will become criteria in operating and designing .

Key words: pneumatic conveying; operating parameter; pilot experiment; conveying characters

气力输送在能源发电行业作为各种散装物料的连续输送系统被大量使用,特别在热电厂的煤粉输送、飞灰输送系统,以及洁净煤领域中的煤粉气化等领域正起着日益重要的作用。但气力输送也存在能

收稿日期:2008-03-16

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(502018);浙江省科技计划重点资助项目(2005C21103);浙江省科技计划重点资助项目(2006C21058)

作者简介:林 江(1963—)女,浙江宁波人,教授,博士,主要从事流体机械、多相流理论及应用研究。

耗高的问题,而且广泛的应用使得这个问题的解决显得尤为重要。因此,优化设计和选择最佳运行参数就格外必要。为掌握气力输送系统气固两相流的流动特性,以便从设计和操作两方面满足过程对输送优化的要求,不少研究者进行了较多的研究工作。国内外均有大量的气固两相流理论和流动机理研究的报道^[1-6]。但气力输送系统内部气固两相流动的状况非常复杂,固粒在输送管内的运动涉及气流速度的分布以及固粒与管壁摩擦等各种因素。固粒的运动状态既有滚动又有悬浮,同时还发生固粒与固粒、固粒与壁面的碰撞,固粒的旋转还产生举力等,使得目前的理论研究还未能形成系统全面的实用设计运行理论。因此,利用工业性试验研究为设计和运行提供依据成为最直接有效的方法。国内外在这方面也有研究,Narimatsu^[7]等研究了管径为 53.4 mm 的输送管中玻璃固粒对垂直气固两相输送流动动力学性能的影响。从压力梯度与气流速度的试验曲线中给出了流动从稀相转向浓相的最小压力梯度点,并拟合了一个玻璃球形固粒气流传输转化速度的预测公式,得出固粒直径从 1.00 mm 增加到 3.68 mm,密度从 935 kg/m³ 增加到 2 500 kg/m³ 时,对于浓相输送压力梯度增大,稀相输送压力梯度则无变化;随着粒径和密度的增加,稀相向浓相转变的速度点(U_{min})增大。Taylor^[8]利用一套垂直气力输送系统研究了系统能量消耗和被送材料的磨损问题,给出了 4 种材料在不同固粒粒径时的能耗和磨损率。Wypych^[8]综述了超长距离和高出力的粉体气力输送技术,通过试验给出了仓泵设计的经验公式。Herbreteau^[9]进行了水平管中流态变化时流动参数对最小能量的影响试验研究,考虑了粒径、固粒密度对压降、Froude 数的影响。Grzegorz^[10]对垂直气力输送的加速区流动特性进行了研究,用均一流模型和阻力公式相结合给出了精确预测球形固粒和非球形固粒在垂直气力输送系统加速区压降的可能性。这些研究针对一定的条件,给出了压力、速度、能量等参数对输送从稀相向浓相转变的特征量及对垂直管、水平管的影响等,但在优化运行参数的研究方面还有许多问题有待于进一步探讨。

本文基于工业规模的正压气力输送系统,在完全模拟实际工况的条件下,进行了固粒输送时流动动力学特征量和操作参数试验研究,对输送距离为 200 m 的正压浓相气力输送运行特性作了比较全面的定量描述和分析,全面考虑空气质量流量 G_g

(kg/s)、开泵压力的变化对系统出力、固气比的影响,给出输送图谱和最佳运行参数;揭示正压密相气力输送的运行效率及其与操作参数的关系。

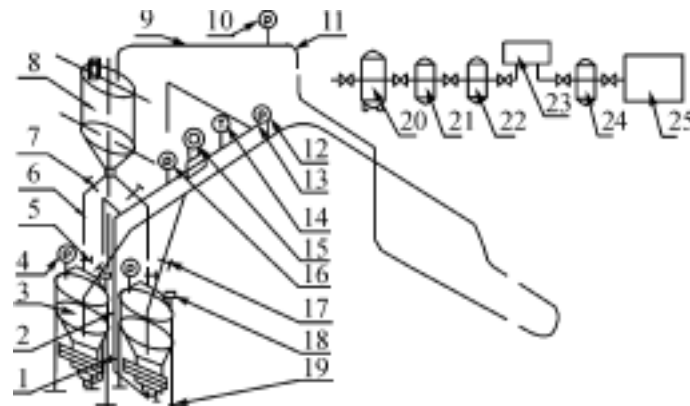
1 试 验

1.1 试验材料

试验是在 200 m 输送距离的实际工况条件下进行的。输送物料为火电厂粉煤灰,粒度分布在 40 ~ 80 μm 范围内,其物性参数为:平均粒径(70%) 50 μm ,密度 2 050 kg/m³,堆积密度 695 kg/m³,颗粒形状为球形。

1.2 试验装置

试验在气力输送研究所专门建立的装置上进行,试验装置如图 1 所示。整个装置由灰库、进料阀、进料管、仓泵、出料阀、输送管、压缩空气气源装置、输气管以及测量和控制装置等组成。试验装置完全按工业实际输送系统设计,采用 PC-PLC 控制系统控制。其中,输灰管总长 200 m,钢管,粗糙度 $Ra0.5$,内径为 100 mm,输送爬高 15 m。管线由 1 个三通管、10 个弯头、3 段垂直管、8 段水平管、1 段倾斜管组成。主要设备参数为:SA-475W 螺杆式空压机,供气量 9.9 m³/min;冷冻式干燥机,处理量为 12.0 m³/min,带主管过滤器、微油过滤器;储气罐,容量 20.0 m³;仓泵,容量 1.0 m³。主要测量仪表: P_3 压力变送器,量程 0 ~ 1.0 MPa;温度计 WZP-270PT100 铂热电阻,量程 - 100 ~ 200 ; 104-AAUS4J-S3S3 \times E 旋涡流量计,量程 0 ~ 1 300 kg/h; T-BXB-1A 称重传感器,量程 1.0 t。



1 - 进气阀; 2 - 气源母管 47 mm \times 3.5 mm; 3 - 仓泵; 4 - 泵内压力测点压力表; 5 - 进料阀; 6 - 进料管; 7 - 手动进料阀; 8 - 灰库; 9 - 输灰管 108 mm \times 4 mm; 10 - 输灰管出口压力测点压力表; 11 - 输送管线上弯管; 12 - 输灰管入口压力测点压力表; 13 - 接气; 14 - 温度计; 15 - 气源母管流量计; 16 - 气源母管压力测点压力表; 17 - 出料阀; 18 - 料位计; 19 - 称重传感器; 20 - 储气罐; 21 - 微油过滤器; 22 - 主管路过滤器; 23 - 干燥机; 24 - 主管路过滤器; 25 - 空压机

图 1 试验装置图

Fig. 1 Experimental equipment

1.3 试验方法

系统运行时,灰库中的被送物料通过进料管经进料阀进入流化仓泵(进料),在到达一定的重量后,关闭进料阀;打开进气阀通入压缩空气,进入流化阶段(流化);到达一定压力后,关闭进气阀,开启出料阀,由空气运载的物料进入输送管道,经输送管道送至卸料器分离,物料由重力作用回到灰库,空气经布袋除尘器处理后排放到大气中;经一定的时间后仓泵中的物料基本输送完毕(输送),再通入压缩空气进行吹扫(吹扫),使仓泵中的物料全部送出,完成一次输送。

对表观速度和开泵压力双因素进行了试验,在一定的空气质量流量下,改变不同的泵内压力进行输送试验。空气质量流量变化通过改变气源母管进气阀的开度实现;在同一空气流量下,分别以 300, 200, 150, 100, 50, 0 kPa 量级的泵内压力进行输送试验,并连续记录整个输送周期内的仓泵压力、气源压力、输灰管入口压力、输灰管出口压力、仓泵重量、耗气量等参数。

2 试验结果与讨论

在给定的输送距离下,系统具有高的输送能力是气力输送系统设计的最基本准则。输送能力定义为出力 m , 单位时间的输送量, t/h 。设计和评估气力输送系统,就是评价在给定的输送距离下,系统获得高出力的可能性和达到高出力所付出的代价,如能量消耗、输送系统及物料的磨损等,这些因素与所采用气力输送系统本身以及输送物料的性能,如固粒的粒径、密度、流动性和固粒在空气中的渗透性等有关。在给定系统和输送物料的情况下,运行参数的优劣对能耗高低、系统磨损起决定作用;运行参数的选择对确定新装置设计的主要参数(如管径等),获得优化的设计至关重要。在气力输送系统中,影响出力的因素是多方面的和综合交叉的。高的固气比表征了浓相,低压、低耗气量即为低速低能耗。以往的研究已表明,气力输送的功率消耗与表观速度的平方成正比;系统管道和物料的磨损也与表观输送速度的 2~3 次方成正比^[6]。本研究给出了系统运转中表观速度、压力等主要参数的运行规律,从而得出高出力、低速低能耗的最佳输送参数。

固粒气力输送系统运转的主要参数为:固气比 $\mu(\text{kg/kg})$ 、出力 $m(\text{t/h})$ 、固粒质量流量 $G_s(\text{kg/s})$ 、空气质量流量 $G_a(\text{kg/s})$ 、打开出料阀时的泵内压力

$P_i(\text{kPa})$ 即开泵压力、输灰管入口压力 $P_i(\text{kPa})$ 、输灰管出口压力 $P_o(\text{kPa})$ 、表观气流速度 $v(\text{m/s})$ 、压降 $P(\text{kPa})$ 。

2.1 气流质量流量的影响

图 2 给出了试验时进气阀不同开度时(分别为 1、2、3、4、5 种流量),在不同开泵压力下的系统平均空气流量。理论上该 5 条线应为 5 条水平线,但按实际耗气量计算所得有所波动。后面所述的试验分别在该 5 种流量下进行。曲线 6 代表了极小流量的状态,以研究堵塞发生的临界状态。图 3 为据此计算所得的表观速度。

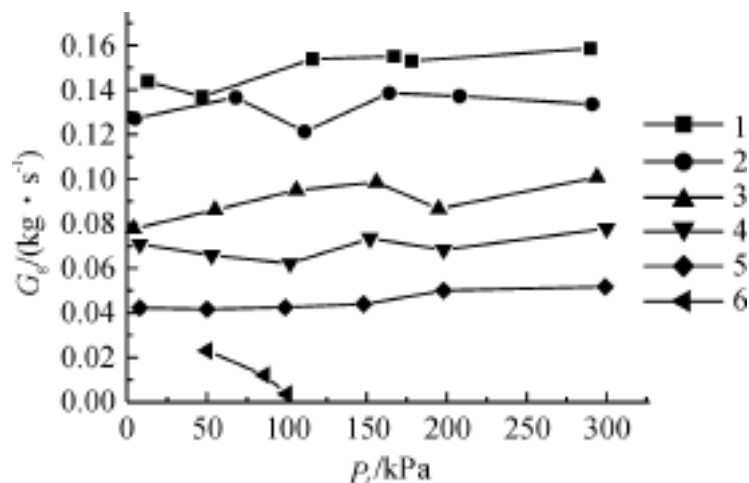


图 2 不同开泵压力时空气流量的变化

Fig. 2 Air mass flow rate VS Pressure

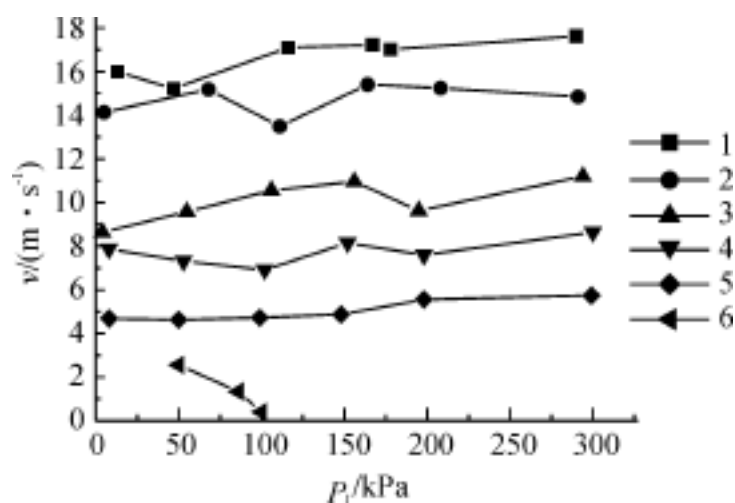


图 3 不同开泵压力下的表观速度

Fig. 3 Superficial air velocity VS Pressure

图 4 给出了在不同空气流量时,变化开泵压力时系统的出力。由图可得,当空气流量一定时,也即表观速度一定时,压力变化对系统的出力影响很大,特别是在低速时。即空气流量小于 0.1 kg/s 时,随着压力的增大,出力直线增大;当空气流量增大到一定值时,约大于 0.1 kg/s 时,增大压力对提高出力没有明显作用。压力增大,出力在一定范围内循环。在较大的空气流量时,也即是高速时,即使压力很小也可达到较高的出力。

图 5 给出了空气流量与固气比的关系。在上述

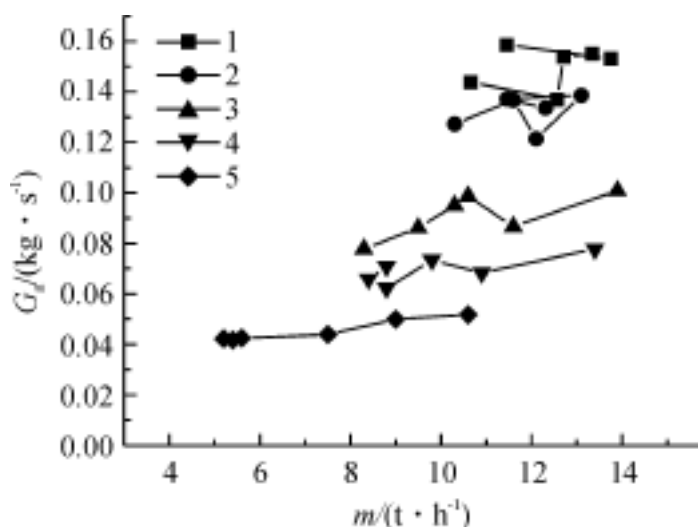


图 4 系统出力与气流量的关系

Fig. 4 Air mass flow rate VS throughput

条件下,变化开泵压力时系统的固气比。由图可见,当气流量一定,由开泵压力的变化可得,在低气流量即低速时开泵压力对系统的固气比影响很大。在试验条件下当空气流量小于 0.1 kg/s 时,随着压力的增大,固气比直线增大;当空气流量增大到 0.1 kg/s 以上时,增大压力对提高出力没有明显作用,压力增大,固气比在小范围内变化。但在较大的空气流量时,也即是高速时,固气比低。固气比随着气流量的增大而降低,这与空气质量流量对出力的影响趋势相同。

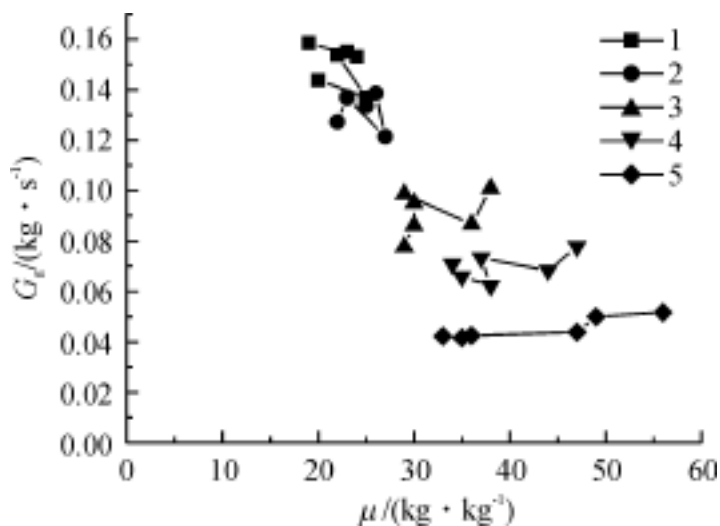


图 5 固气比与气流量的关系

Fig. 5 Air mass flow rate Vs solid-gas loading ratio

由此可知,空气质量流量是影响输送的主要因素,表观速度等于空气质量流量除以管道截面积,当管径给定时,气流量的影响等于表观气速的影响。因此,在高速区出力和固气比是速度的单因素关联,且变化趋势相同。而低速区,出力和固气比则是压力和速度的双因素关联。这个结果与现有的工程设计中概念不同。通常认为给定的气力输送系统在一定的输送速度下即能达到某固气比的概念是不准确的。试验证明,即使是在特定的系统下,出力和固气比都是运行参数的函数,受运行参数的制约。

2.2 压力的影响

压力是又一重要的运行参数。试验连续测量记录了系统的泵内压力 P_i 、输灰管入口压力 P_i 、输灰管出口压力 P_o 。由试验数据可得,在稳定输送阶段,泵内压力 P_i 与输灰管入口压力 P_i 之间相差一恒定值,约为 $12 \sim 16 \text{ kPa}$ 。定义开泵压力为:打开出料阀瞬时的仓泵内压力,作为操作的控制参数。分别在 1 组(流量约为 0.15 kg/s), 2 组(流量约为 0.13 kg/s), 3 组(流量约为 0.09 kg/s), 4 组(流量约为 0.07 kg/s), 5 组(流量约为 0.04 kg/s), 5 种流量情况下,以开泵压力约为 $0, 50, 100, 150, 200, 300 \text{ kPa}$, 进行试验。得出开泵压力与出力的关系如图 6 所示。

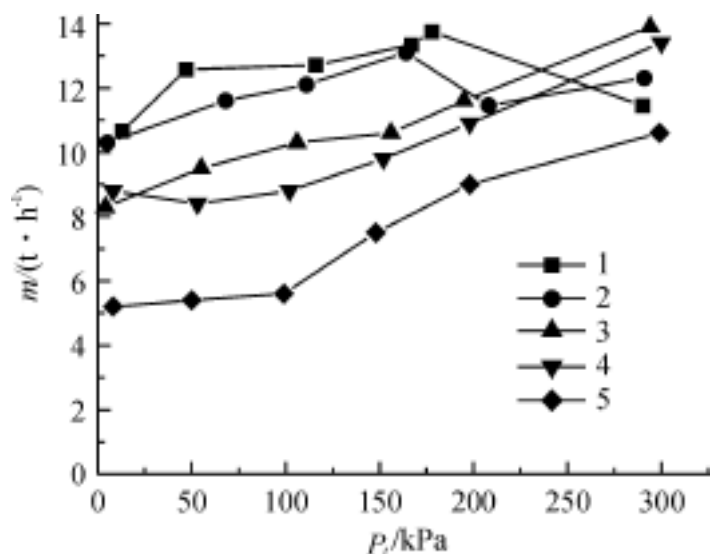


图 6 系统出力与开泵压力的关系

Fig. 6 Throughput VS the pressure P_i

由图 6 可更为明显地看出,在低速区,出力为压力的增函数,并且流量越小,压力变化的影响越大。在高速区,试验条件下空气流量为 1、2 组,在低压区出力随压力增大而增大,但当压力增大到一定值后,压力增大,出力反而降低,有出现峰的倾向。

图 7 为固气比与开泵压力的关系。在高速区,空气流量为 1、2 组时,固气比低,试验条件下约为 20 左右。压力变化几乎不影响固气比;增大压力,不能提高固气比,即高速区固气比基本恒定。这表明提高速度、增大压力无助于固气比的提高,只会增加能耗和磨损。在低速区,空气流量在 3、4、5 组时,固气比随压力增大而增大。空气流量越低,即速度越低,固气比越高,压力的影响越大。

2.3 固气比与出力

上面分别讨论了空气质量流量和开泵压力对固气比和出力的影响。气流量越低,表观速度越低,固气比越高。压力对固气比、出力的影响存在高速和低速两个性态明显不同的区域,低速区压力的影响

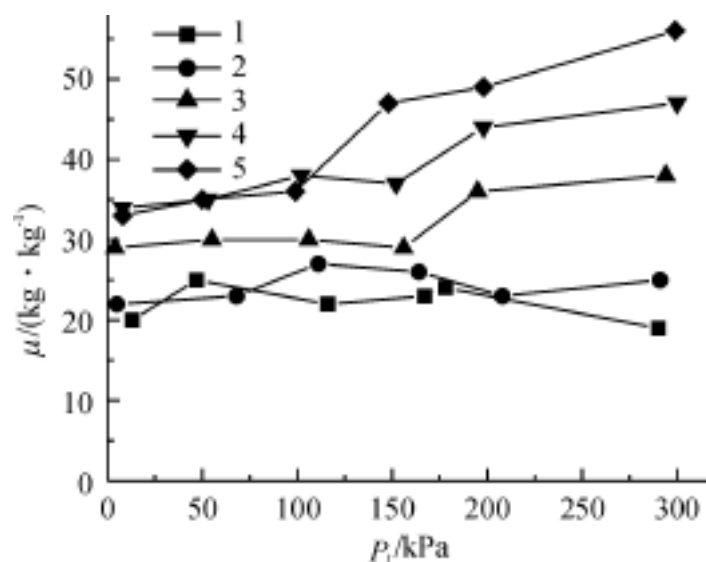


图7 固气比与开泵压力的关系

Fig. 7 Solid-gas loading ratio VS the pressure P_t

较大,高速区压力的影响很小。增大速度、压力即增加能耗。固气比增大,输送时间显著增长,影响输送效率。如前所述,从理论上说低速、高固气比对系统运行有利。在很低的气流量时,固气比甚至可高达166以上。但随着固气比的增大,输送时间大大延长,出力变小,系统效率低下。因此,必须在固气比与出力中得出一个最佳的点。高出力、高固气比为运行的最佳点。图8给出了出力与固气比的关系。由图8可见,存在这样的最佳点,在低速高压时系统出力最高,同时固气比也高,为浓相输送。高速中压时也存在高出力点,但固气比较低,为稀相输送,此时系统磨损较大。试验条件下,最佳点为出力13.6 t/h、固气比47,空气质量流量0.07 kg/s、表观速度8.65 m/s、开泵压力298.4 kPa。

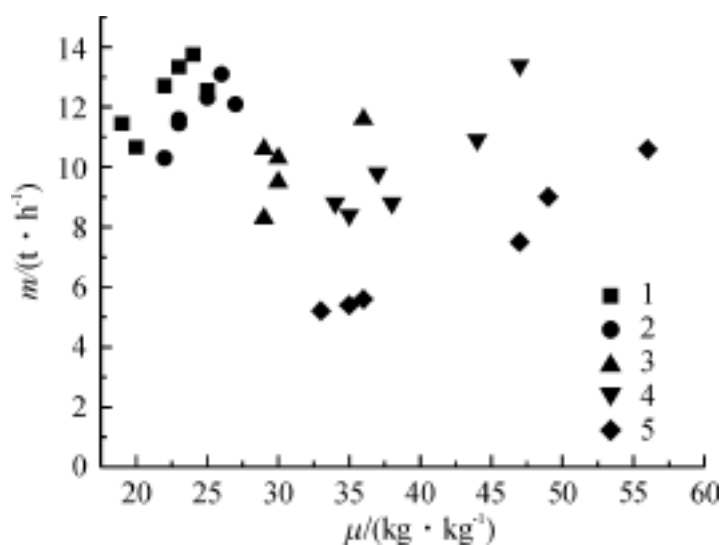


图8 固气比与系统出力

Fig. 8 The relation of throughput VS solid-gas loading ratio

3 结论

1) 空气质量流量也即表观速度是影响输送的主要因素。

2) 存在高速和低速两个性态明显不同的区域。

3) 高速区,出力和固气比是速度的单因素关联,且变化趋势相同;低速区,出力和固气比则是压力和速度的双因素关联。

4) 高速区,增加压力对提高出力、固气比无明显作用;低速区出力随压力增大而增大,但当压力增大到一定值后,压力增大,出力反而降低,有出现峰的倾向。固气比随压力增大而增大,速度越低,固气比越高,压力的影响越大。

5) 低速高压时存在高出力、高固气比的运行的最佳点。

参考文献:

- [1] LI Hui, TOMITA Yuji .Numerical simulation of swirling flow pneumatic conveying in a horizontal pipeline Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/ Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1994, 60(575): 2431-2438 .
- [2] FERREIRA Maria do Carmo, FREIRE Jose T, MASSARANI Giulio .Homogeneous hydraulic and pneumatic conveying of solid particles[J] . Powder technology, 2000(1): 46-54 .
- [3] PAN R, JONES M G . Low-velocity slug-flow pneumatic conveying of bulk solids [J] .Powder Handling and Processing, 2001, 13(2): 185-189 .
- [4] 林建忠,林江,李玉麟,等 .耐磨气固两相流离心风机的理论与开发[J] .中国机械工程,2004,14(1): 12-15 .
- [5] 林江 .气力输送系统中加速区气固两相流动特性的研究[J] .浙江大学学报:工学版,2004,38(7): 893-898 .
- [6] NARIMATSU C P, FERREIRA M C . Vertical pneumatic conveying in dilute and dense-phase flows: Experimental study of the influence of particle density and diameter on fluid dynamic behavior [J] . Brazilian journal of chemical engineering, 2001, 18(3): 221-232 .
- [7] TAYLOR T . Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying [J] . Powder technology, 1998: (95): 1-6 .
- [8] WYPYCH P W . Pneumatic conveying of powders over long distance and large capacities [J] . Powder technology, 1999, 104(3): 278-280 .
- [9] HERBRETEAU C, BOUARD R . Experiment study of parameters which influence the energy minimum in horizontal gas-solid conveying [J] . Powder technology, 2000(3): 213-220 .
- [10] DZIDO G, PALICA M, RACZEK J . Investigation of the acceleration region in the vertical pneumatic conveying [J] . Powder technology, 2002(2): 99-106 .