

真空物料输送系统能耗对比研究

刘振伟,孙中圣

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:真空泵和康达效应式真空发生器均可作为真空物料输送系统的气源机械,目前两种系统间并没有明确的选用指标,而合理选型有利于降低系统能耗。针对这一问题,分别基于真空泵和康达效应式真空发生器搭建了实验平台,分别以聚丙烯颗粒、石英砂、蛭石粉末为输送材料,进行不同工况下的实验研究,得到两种系统的能耗变化规律。在实验基础上,对两种系统的功率特性进行分析,推导出两种系统选用的能耗判据。

关键词:真空输送;真空泵;康达效应式真空发生器;能耗

中图分类号:TH232 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0016-03

Comparative Study on Energy Consumption of Vacuum Conveying System

LIU Zhenwei, SUN Zhongsheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Both vacuum pump and Coanda ejector can be used as the air source machinery in the vacuum conveying system. At present, there is no clear index for the selection of the two systems, and reasonable selection is conducive to reducing the system's energy consumption. To solve this problem, the experimental platform based on the vacuum pump and Coanda ejector is built respectively. The experimental research is carried out under different working conditions with polypropylene particles, quartz sand and vermiculite powder as conveying materials to obtain the two systems' change rules of energy consumption. Based on the experiment, the power characteristics of the two systems are analyzed, and the energy consumption criterion is derived.

Keywords: vacuum conveying; vacuum pump; Coanda ejector; energy consumption

0 引言

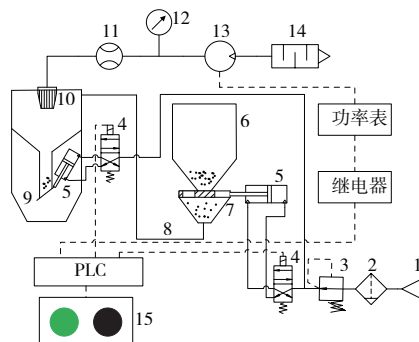
根据管道内的压力状态,气力输送的一般形式可分为正压输送与真空输送两种。与正压输送相比,真空输送由于管道内为负压且空气在完成物料输送之后才经由气源机械排入大气,降低了物料外逸、机油等杂质混入物料的概率,对输送有毒、清洁度要求高的物料有着显著的优越性^[1]。但是真空输送也存在着能耗高的问题,相同工况下,正压输送的能耗仅为真空输送的51%。

目前,国内大多数企业在真空输送系统中所采取的节能措施对于气源机械选择方面的认识和重视度不足^[2]。传统的真空物料输送系统中,大多采用真空泵作为气源机械,而SMC公司生产的ZH系列真空发生器应用了康达效应,使吸入流量与真空度大大提升,满足物料输送工作要求,也可应用于真空物料输送系统。由于缺少真空泵和康达效应式真空发生器的对比研究,导致企业在两种系统的选用问题上没有明确的指标。

因此,本文分别基于真空泵和康达效应式真空发生器搭建了物料输送能耗实验平台,并进行了不同工况下的能耗实验,分析了两种系统的能耗变化趋势及其原因,最终推导出两种系统基于能耗的选用判据。

1 真空物料输送系统实验平台

为了进行不同工况下真空泵和康达效应式真空发生器的能耗对比实验,自制了如图1所示的实验平台,实现了物料输送的自动化运行以及系统工作参数的采集记录。两种系统的供料装置、分离过滤装置以及输料管道均采用了相同的结构^[3]。其中,输料管道采用PVC透明钢丝软管,可直接观测到物料流动状态,管道总长 $L=3\text{ m}$,内径 $D=32\text{ mm}$,采用水平转竖直向上布置,水平段长度 $l=0.5\text{ m}$,竖直段长度 $h=2.5\text{ m}$ 。



(a) 真空泵实验系统

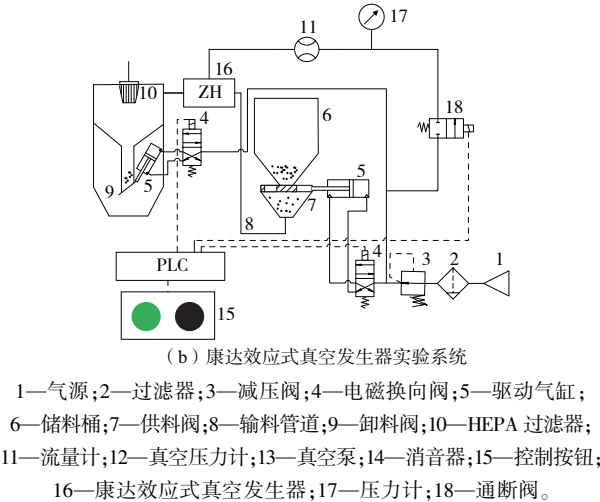


图1 实验平台示意图

在实验过程中,通过减压阀与变频器分别调节真空发生器供气压力和真空泵供电频率,以模拟不同的工况。选用 ZH20-X185 型康达效应式真空发生器,供气压力由 0.2 MPa 逐步调节至 0.4 MPa,对应耗气量由 500 L/min 逐步调节至 800 L/min,间隔 10 L/min。选用 DPD040 型涡旋真空泵,供电频率由 20 Hz 逐步调整至 50 Hz,间隔 1 Hz。

根据物料的中粒径和松散堆积密度,可将物料分为 PC1、PC2 和 PC3 三类,不同类别物料输送时的流动状态也不同^[4]。PC1 组中的物料(飞灰、水泥、石粉等)可以流畅而平稳地从稀相到流态化密相输送;PC2 组中的物料(塑料颗粒、大麦等)在管道内的流动状态为稀相或不稳定区;PC3 组中的物料(破碎煤片、铅砂等)能够以稀相输送。为了模拟不同工况下的物料输送,保证数据具有一定的代表性,从三类物料中各选一种进行实验,如表 1 所示。

表1 实验物料特性

物料	中粒径/mm	松散堆积 密度/(kg·m ⁻³)	类别	实际流动状态
聚丙烯颗粒	4.07	550	PC2	悬浮流
石英砂	1.81	1 540	PC3	沙丘状栓流
蛭石粉末	0.35	190	PC1	悬浮流

2 实验研究与结果分析

以往的研究表明,影响真空物料输送系统能耗的因素众多,包括输料管道材料、输送距离、管道布置等。而在本文中,主要目的在于探究真空泵和康达效应式真空发生器在不同工况下的能耗对比,以提出基于能耗的选用判据,为企业提供选型指导。因此在对比实验中,仅考虑真空泵和康达效应式真空发生器本身特性对于能耗的影响,其余影响因素则作为定量进行研究。

2.1 输送能力研究

研究两种真空系统的能耗时,只有在抽气能力相当的情况下才是合理的。对于真空物料输送系统而言,抽气性能直接影响着系统的输送能力。图 2 为两种系统在不同真空泵供电频率或真空发生器供气压力下的输送能力对

比,由该图可确定两种系统输送能力相当时的工况,即两种系统抽气性能相当时的工况。

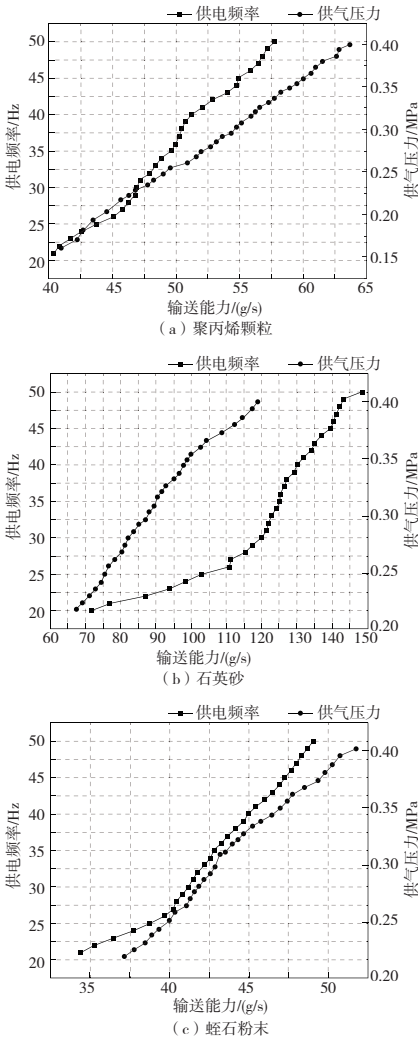


图2 两种系统输送能力对比

对于同种物料,分别基于真空泵系统和真空发生器系统进行输送时的输送能力有着一定差距。这与真空泵和康达效应式真空发生器的流量特性差异有关,如表 2 所示。在相同的吸入流量下,真空泵所能达到的真空度更高;而真空发生器与真空泵相比,在较低的真空度下,可提供较高的空气流量。当物料在管道内以稀相悬浮流输送时,主要是依靠空气的动压进行输送,因此空气流量较高的真空发生器系统更有利于聚丙烯颗粒和蛭石粉末的输送;而当物料以栓流输送时,则主要依靠空气的静压进行输送,因此真空度更高的真空泵系统更有利于石英砂的输送。

表2 流量特性对比

吸入流量/(L/min)	真空度/kPa	
	真空泵	真空发生器
650	9.0	6.0
630	8.3	5.5
600	7.6	4.7
570	6.9	4.0
550	6.6	3.4
500	5.3	1.7

2.2 系统能耗研究

通常,以耗电量评价真空泵的能耗,以耗气量评价真空发生器的能耗,两者无法直接比较,因此需要引入气动功率将真空发生器的耗气量进行换算。根据定义,真空发生器的气动功率可由式(1)进行计算^[5]。

$$P = \frac{dE}{dt} = p_a Q_a \ln \frac{p}{p_a} \quad (1)$$

式中: P 为气动功率; p_a 为大气压力; Q_a 为压缩空气在大气状态下的体积流量; p 为压缩空气的压力。

在实验过程中,根据图2来调整两种系统的供电频率和供气压力使其在相近的输送能力下工作,并采集真空泵实时功率、真空发生器供气压力和耗气量等参数,对数据进行处理后得到图3所示的能耗对比结果。

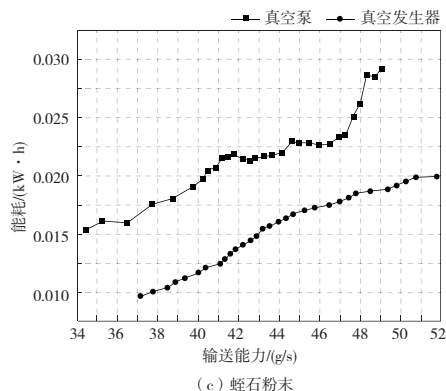
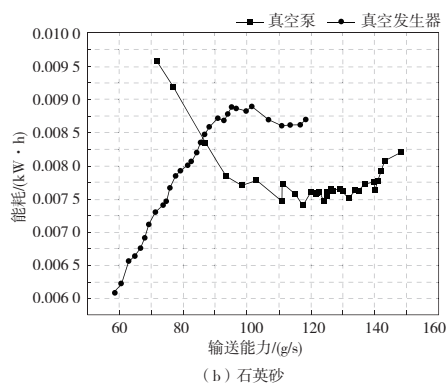
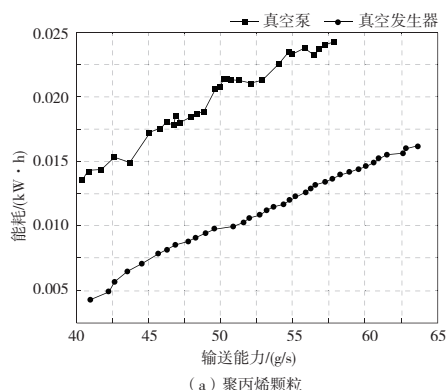


图3 两种系统的能耗对比

结合图3中两种系统的能耗对比以及三组物料在管道内的流动状态分析,可知:

1) 对于蛭石粉末和聚丙烯颗粒,真空发生器系统的能耗远低于真空泵系统。其原因在于:这两组物料在管道内的输送形式均为悬浮流输送,输送单位质量物料消耗的风量较大,而真空发生器与真空泵相比,在相同功率下,能提供的风量更大,因此更有利于此类物料的输送。

2) 对于石英砂,当输送能力较高(>86 g/s)时,真空泵系统能耗更低;反之,真空发生器系统能耗更低。其原因在于:石英砂松散堆积密度大,在输送过程中,为了克服本身的重力,对于系统的真空度要求更高,而真空泵系统相较于真空发生器系统而言,在相同功率下,真空度更高,完成输送时间更短。与真空泵系统不同的是,当输送能力较低时,由于真空发生器系统所能提供的空气流量较大,物料在管道中将由沙丘状栓流输送逐渐转化为稀相悬浮流输送,而不会产生物料悬浮在管道中导致输送时长大幅增加的现象,能耗也不会大幅增加。

2.3 能耗判据分析

为了解决目前企业在两种系统的选用上没有明确指标这一问题,在上述实验结果的基础上,基于两种系统的功率特性推导了两种系统选用的能耗判据。

图4为两种系统在同一工况下(输送聚丙烯颗粒,输送能力55 g/s)工作的实时功率变化对比。在物料输送过程中,真空泵的实时功率将随着负载的变化而变化,由于真空泵启动方式为变频启动,因此达到稳定状态所需时间较长;而真空发生器的供气压力和耗气量并不受负载变化的影响,因此真空发生器的实时功率保持不变。

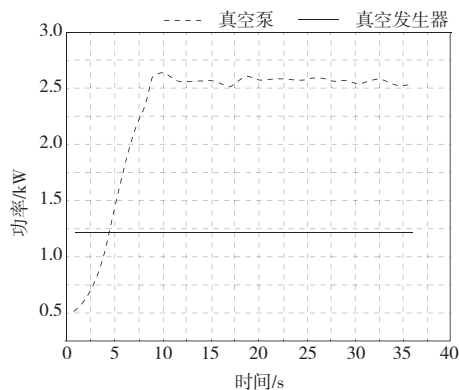


图4 两种系统功率特性对比

由图4可以看出,真空泵功率在经历一段时间 Δt 后趋于稳定,记 Δt 时间内真空泵的平均功率为动态平均功率 P_d ,记真空泵稳定运行时的功率为稳定功率 P_e ,则真空泵系统单次输送能耗 E_1 的计算公式为

$$E_1 = [P_d \Delta t + P_e (t - \Delta t)] / 3600 \quad (2)$$

式中 t 为单次输送所需的时间。而真空发生器的功率始终保持不变为 P_e ,则真空发生器系统单次输送能耗 E_2 的计算公式为

$$E_2 = P_e t / 3600 \quad (3)$$

令 $E_1 = E_2$,便可得到两种系统能耗相同时的输送时长 t^* 的计算公式。

$$t^* = (P_e - P_d) \Delta t / (P_e - P_e) \quad (4)$$

(下转第33页)

参考文献:

- [1] 于占俊,田兴波. 关于钩舌下牵引台根部裂纹的分析与建议[J]. 铁道车辆,2018,56(3):44.
- [2] 王永亮. 大秦线 16、17 型车钩牵引台裂纹故障浅析[J]. 科技视界,2017(8):122,47.
- [3] 朱涛,徐京涛,王超,等. 伤损车钩失效形式调研分析研究报告[R]. 成都:西南交通大学,2020.
- [4] CHUNDURU S P, KIM M J, MIRMAN C. Failure analysis of railroad couplers of AAR type E [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1):374-385.
- [5] 于兆华. 17 号车钩、钩尾框疲劳寿命及可靠性分析[D]. 北

京;北京交通大学,2009.

- [6] INFANTE V, BRANCO C M, BRITO A S, et al. A failure analysis study of cast steel railway couplings used for coal transportation[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(4):475-489.
- [7] 李晨曦,商跃进,王红,等. 重载货车车钩钩体的强度校核及抗疲劳设计[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(2):57-60, 68.
- [8] 苗伟明,孙丽萍. 基于装配体的 13 号车钩有限元分析[J]. 大连交通大学学报, 2007, 28(4):37-41.

收稿日期:2021-01-05

(上接第 18 页)

当系统输送总质量为 m 的物料时,两种系统能耗同时的输送能力 G^* 便可通过下式进行计算。

$$G^* = m/t^* \quad (5)$$

当系统实际输送能力 $G > G^*$ 时,采用真空泵系统更加节能;反之,当系统实际输送能力 $G < G^*$ 时,采用真空发生器系统更加节能。

根据式(5)可做出抽气能力相当时两种系统选用的判据图,图 5 给出了针对本次实验物料的一种系统选用的判据图。图中的 G^* 曲线将平面分为两部分,当系统实际输送能力 G 在图中处于曲线上方时,即 $G > G^*$ 时,使用真空泵系统能耗更低;当系统实际输送能力 G 在图中处于曲线下方时,即 $G < G^*$ 时,使用真空发生器系统能耗更低。根据图 5 所做出的两种系统的选用判断,与图 3 的实验结果相符,证明了该能耗判据的可行性。

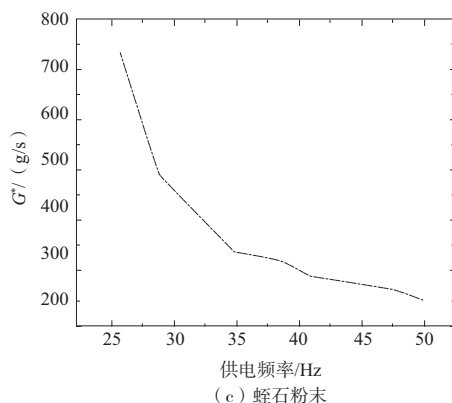


图 5 两种系统选用的能耗判据图

3 结语

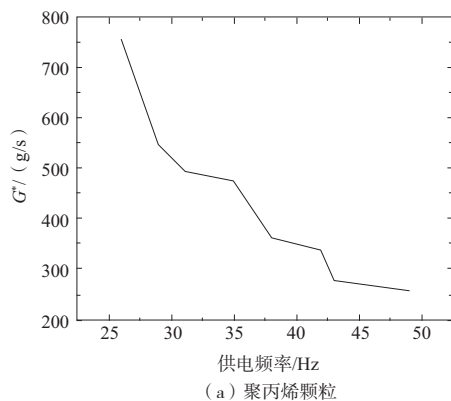
本文分别基于真空泵和康达效应式真空发生器搭建了物料输送系统实验平台,以聚丙烯颗粒、石英砂、蛭石粉末作为实验物料,进行了不同工况下的能耗实验,得到了两种系统输送能力相当时的能耗对比情况,并分析了两种系统能耗变化的原因。

最终,基于两种系统输送物料时的功率特性推导出了两种系统选用的能耗判据公式:当系统实际输送能力 $G > G^*$ 时,采用真空泵系统更加节能;当系统实际输送能力 $G < G^*$ 时,采用真空发生器系统更加节能。

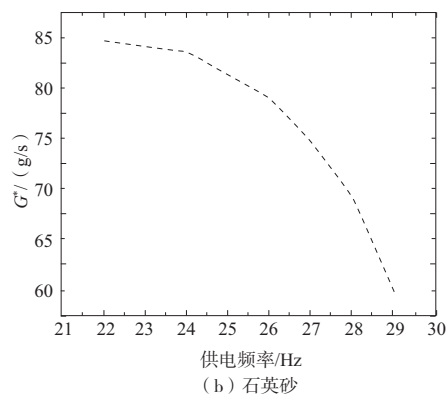
参考文献:

- [1] 杨伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [2] 周洪,苏会莹,王玉宝. 气动控制系统的节能技术[J]. 液压与气动, 2013(7):1-5.
- [3] 马杰. 聚四氟乙烯粉料气力输送系统的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [4] 潘仁湖. 散料料性及其气力输送流动模式[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2006(3):1-6, 53.
- [5] CAI M L, KAWASHIMA K, KAGAWA T. Power assessment of flowing compressed air[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(2):402-405.

收稿日期:2021-01-15



(a) 聚丙烯颗粒



(b) 石英砂