

煤粉加压密相输送系统研究现状及发展方向

李君, 卢洪, 郭屹, 李轩

(北京低碳清洁能源研究所, 北京 102211)

摘要:为优化干法煤气化的煤粉密相输送系统,介绍了加压密相气力输送技术和基于散体力学理论的固体输送泵技术 2 种典型的煤粉加压密相输送技术,分析了 2 种典型技术的技术特征及气体加压密相输送技术中的关键问题,提出了干粉加压固体输送泵的发展方向。固体输送泵技术是未来煤粉密相输送的发展趋势。未来应加强国内散体力学的相关理论、数值及试验研究,包括散体静力学,散体动力学的相关基础研究;研究煤种、水分、粒径等参数与摩擦系数之间的函数关系,确定 Stamet Pump 及 PWR 针对国内煤种所能提供的最大输出压力;确定典型的 Stamet Pump、PWR 的 XTL 技术工业放大的瓶颈所在,提出切实可行的放大解决方案。

关键词:煤粉加压密相输送;Shell;GSP;固体输送泵

中图分类号:TQ546

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)04-0005-04

Research status and development trend of pulverized coal transportation by dense phase conveying system under high pressure

LI Jun, LU Hong, GUO Yi, LI Xuan

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract:In order to optimize the dense phase conveying system in dry coal gasification process, the dense phase pneumatic conveying technology under high pressure and solid conveying pump based on the theory of solid mechanics of granular media were introduced. The characteristics and critical process of the two methods were summarized. The development trend of solid conveying pump under high pressure was introduced. The fundamental research about granular media statics and dynamics, the function relationship between coal types, moisture, particles size and friction coefficient were the focus of the research. The maximum delivery pressure of Stamet Pump and PWR which provided for the coal types in China was researched. Concerning the bottleneck of XTL industrial scale-up, we also put forward the solutions.

Key words:dense phase conveying of pulverized coal under high pressure;Shell;gas schwarze pumpe;solid conveying pump

0 引言

煤粉加压密相输送是干法煤气化的原料供给源头,是影响干煤粉加压气化炉,以及基于干粉加压气化工工艺多联产和整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)连续稳定运行的关键技术之一。目前,煤粉加压密相输送主要有 2 种技术方案:一种是使用气体作为载气的加压密相气体输送技术,该技术主要包括下部出料密相输送系统,如 Shell 和 Prenflo 方

式,以及上部出料密相输送系统,如 GSP(GAS Schwarze Pumpe)方式^[1-2]。第二种是刚刚起步的固体泵输送技术。笔者阐述了 2 种煤粉加压密相输送方式的研究现状,分析了基本原理和存在问题,提出发展方向,为煤粉加压密相输送技术的发展提供一定的技术支持。

1 主要工业干粉加压给料技术

早在 20 世纪 50 年代初期,人们就开始探索煤

收稿日期:2014-10-10;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.04.002

基金项目:神华集团科技创新基金资助项目(ST930014SH02)

作者简介:李君(1980—),男,江苏大丰人,高级工程师,博士,主要从事褐煤提质、煤气化等方面的工作。E-mail:lijun@nicenergy.com

引用格式:李君,卢洪,郭屹,等.煤粉加压密相输送系统研究现状及发展方向[J].洁净煤技术,2015,21(4):5-8,11.

LI Jun, LU Hong, GUO Yi, et al. Research status and development trend of pulverized coal transportation by dense phase conveying system under high pressure[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 5-8, 11.

粉加压密相输送技术,但一直未取得实质性进展。直到1978年Shell-Koppers技术的出现,一种煤粉间断升压和加压下连续给料的半连续式加煤工艺才问世,后来开发的Prenflo、SCGP和GSP等气化炉都归属于此类型^[3]。原料煤经球磨机磨制成符合气化要求的煤粉(一般粒度要求小于0.1 mm,煤样水分1%,褐煤质量分数10%),借助惰性气体将其送至气化界区,经旋风分离后煤粉再次进入常压料仓。煤粉由常压料斗进入增压料斗,即密封料斗,增压后进一步进入压力略高于气化炉的工作料斗,由此被惰性气体吹送至气化炉内。

随着科学技术的发展,基于散体力学的理论基础,开始研究固体输送泵技术,目前典型的技术如Stamet“Posimetric”Pump技术^[4],PWR(Pratt and Whitney Rocketdyne)的XTL技术,Coperion K-Tron公司的Bulk Solids Pump技术等。此外干粉加压螺旋进料技术也可归类于该技术^[5]。

1.1 干粉密相气力输送技术

1.1.1 典型Shell及GSP干粉密相气力输送技术

Shell及GSP干粉密相气力输送技术是目前工业普遍运用的技术,该技术均基于间歇升压、连续加压进料。GSP加压进料系统示意如图1所示。原料入储斗后,打开储斗和锁斗间的阀门1,关闭锁斗和底部进料斗之间的阀门2。当锁斗中原料增加至一定量后,关闭阀门1,将煤锁的压力从常压升至进料斗压力,然后打开阀门2,固体物料落入进料斗,原料由吹送载气送入气化炉。锁斗料位降到一定值后,关闭阀门2,对锁斗卸压,然后开始下一次循环^[1]。

煤粉锁斗和煤粉储斗的排气进入煤粉装料袋滤器,其收集下来的煤粉再排入煤粉储斗。煤粉储斗的下部有锥形的充气锥,利用高压 N_2 或 CO_2 对充气锥进行充气,高压 N_2 或 CO_2 的流量和压力必须严格控制。

干煤粉输送过程中主要消耗的物料为高压 N_2 (或 CO_2)以及低压 N_2 ,高压 N_2 (或 CO_2)由 N_2 (或 CO_2)压缩机提供。要求 N_2 (或 CO_2)必须加热至90℃以上。目前干粉气化压力最高为4.0 MPa,要求输送高压 N_2 (或 CO_2)压力为8.1 MPa,输送密度为350~400 kg/m³。从国内运行经验来看,吨氨输送气电耗约80 kW(与煤种有关)。为保持煤粉管线的干燥,煤粉输送管线需采用蒸汽伴热,一般采用0.5 MPa低压蒸汽伴热。

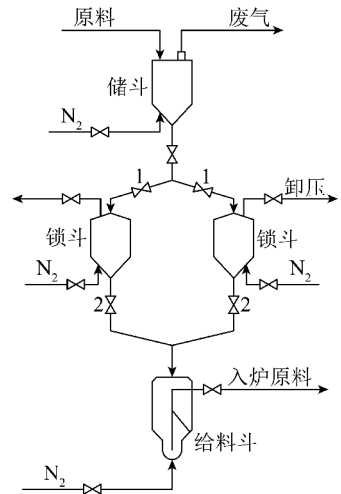


图1 GSP加压进料系统示意

GSP和Shell煤粉加压密相输送原理基本一致,唯一区别在于Shell煤粉加压密相输送采用下部出料发送罐供料器,而GSP则采用上部出料发送罐供料,同时GSP在发送罐的底部装有流化板和搅拌器,输煤管从罐顶部引出并通至气化炉顶部的喷嘴。

1.1.2 不同载气的密相气力输送技术

干粉密相气力输送技术的载气一般为 N_2 、 CO_2 或合成气,具体采用何种载气取决于整个工艺产品。 N_2 作为载气会对气化炉产品产生不利影响,可增加后续合成气系统惰性气含量,降低有效气成分含量及煤气热值。用合成气代替 N_2 ,可减小 N_2 对合成气的污染,但由于合成气含有大量易燃易爆成分,危险性较大。 CO_2 作输送载气较为理想,其在一定程度上可减少工艺蒸汽的需求量,且后续产品气不会由于载气为惰性气体而降低产品气的热值及有效气成分,同时还可改善产品气的组成^[6]。用 CO_2 作为载气特别适合于甲醇合成或其他羰基合成等煤化工技术,在一定程度上为 CO_2 的合理利用探索了新的途径。

1.2 基于散体力学的固体加压输送泵技术

由于载气作为输送介质会对后续产品的气体组成产生一定影响,因此随着人类对散体力学的深入研究,基于煤粉自身散体力学的属性,逐渐开发了固体加压输送泵技术(图2)。基于散体力学及固体密封原理,固体从上部低压区进入管道内,由于管道下部压力较上部压力大,压差会将固体往上部推移。但是由于上部连续进料,会阻止物料上移,至此,物料会被慢慢压实,由于固体物料压实后具备一定的密封效果,即上部和下部的气体不发生串气,若此时

带动被压实的物料运动,即可将被压实的物料输送至高压部件中,从而实现气化炉连续稳定的固体物料供给。

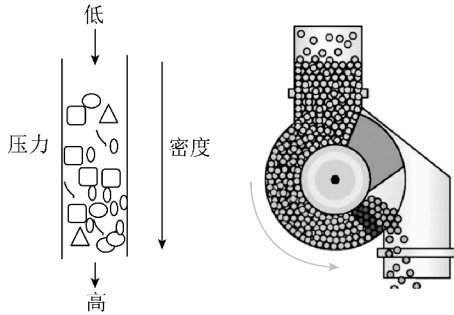


图 2 基于散体力学的加压密封输送泵示意

20 世纪末,在美国能源部(DOE)的支持下,GE 公司开发了基于散体力学的固体加压输送泵技术,即 Stamet “Posimetric” Pump(图 3)。Stamet “Posimetric” Pump 只有 1 个转动部件即旋转阀芯,该转动部件由 2 个磁盘与轮毂组成,2 个磁盘的中心套在旋转轴上,即 2 个磁盘和旋转轴组成一 U 型固定的空间,煤料被锁定在 U 型空间内,旋转轴带动 2 个磁盘一起旋转。煤料从 Stamet “Posimetric” Pump 入口进入后被锁定在 U 型空间内,然后随着中心旋转轴的旋转被旋转至泵的出口而排出泵。

目前 Stamet “Posimetric” Pump 的最大输出压力能达到 6.9 MPa,但该技术处于实验室研究阶段,还未得到工业化应用。PWR 也开发了相似的固体输送泵技术,Coperion K-Tron 公司开发了 Bulk Solids Pump^[7]。

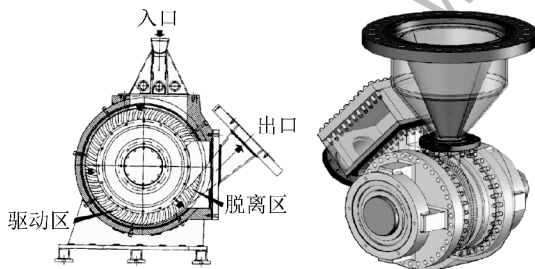


图 3 Stamet “Posimetric” Pump 示意

2 干粉加压进料技术研究现状

2.1 压降

2.1.1 密相气力输送阻力特性

干粉加压密相气力输送过程中的压降关系到整个系统载气供给压力的设定,气化炉操作压力的确定等,是整个气化工序的关键性因素之一。Wen 研究了不同平均粒径煤粉在水平管内的流动特性,建

立了压降经验公式^[8]:

$$\frac{\Delta P}{L} = 41.82 M_s A^{-0.45} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{0.25} \left(\frac{M_g}{2\rho_s} + \frac{M_s}{\rho_s} \right)^{-0.55}$$

式中, $\Delta P/L$ 为单位管长压损, kPa/m; M_s 为煤粉质量流量, kg/s; A 为管道截面积, m^2 ; d_s 为煤粉平均粒径, mm; D 为管道内径, mm; M_g 为输送气体质量流量, kg/s; ρ_s 为煤粉密度, kg/m^3 。

虽然该方法考虑了物料特性、管道几何参数等,但在预测其他输送试验时,还存在一定误差。

Barth 基于能量守恒原理,提出了附加压损模型。水平及垂直管内稳态流动的管道压降(ΔP)可表示为^[8]:

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_s = (\lambda_g + \lambda_s \mu) \frac{\rho_g U^2 L}{2D}$$

式中, ΔP_g 为气相压损, kPa; ΔP_s 为固相压损, kPa; λ_g 为气相压损系数; λ_s 为固相压损系数; μ 为固气质量比, kg/kg ; ρ_g 为输送气体密度, kg/m^3 ; U 为表观气速, m/s ; L 为管道长度, mm。

2.1.2 气力输送相图

对于高压密相气力输送,输送过程中流型变化对输送性能的影响至关重要。同时由于高压密相输送自身的复杂性,颗粒与颗粒、颗粒与壁面间的相互作用也非常重要。在特定的条件下,散料流动的模式对操作条件和设备环境(如固体和气体流率、管道材料和几何尺寸以及散料供料方法)变化非常敏感。目前该研究还处于发展阶段,相关理论研究还不成熟。Zenz 等^[9]提出了用气力输送相图来描述输送系统内其他表观流速与压降梯度间的关系(图 4)。

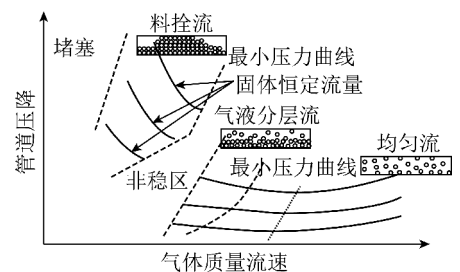


图 4 水平气力输送相图

由图 4 可知,固体流率固定不变时,随着气体速度的减小,散料在水平管道内可能依次呈现 4 种不同的输送模式,即均匀流、分层流、介于分层流和料控流之间的非稳态输送模式、料控流。

但是建立 Zenz 相图不存在普遍性,需要从实验室、工厂、甚至工业试验中获得数据。为了克服试验

数据的来源问题,许多学者对管道内的散料输送模式机理进行研究,从而建立起相关的理论模型来预测管道内压力损失、颗粒磨损量等关键指标,以此获得合理的操作参数。

2.2 试验及数值模拟

2.2.1 加压密相气力输送过程的理论及数值研究

干粉加压密相气力输送过程是一个极其复杂的过程,整个过程中涉及的影响因素很多。目前国内可查的理论及数值研究相对较少,如匡世波^[10]基于离散单元法(DEM)和计算流体力学(CFD)对水平稳态料栓流、水平料栓的非稳定运动以及垂直气力输送中散料流动模式等进行了详细力学分析。彭小敏等^[11]针对目前气力密相输送数值模拟过程中存在的关键问题,建立了一种描述固相内部相互作用对颗粒运动影响的数学模型,运用该模型对稠密气固两相流动进行了相关数值模拟研究。梁财^[12]将先进的SHANNON信息熵分析方法引入高压超浓相煤粉气力输送流动特性的研究中。通过分析特征信号脉动时间序列的信息熵,获取SHANNON熵与输送差压、含水率、风量及表观速度等之间的关系,建立信息熵与高压浓相输送过程中两相流流动特性之间的联系,进而辨别其输送形态,并分析其稳定性。

干粉加压密相气力输送过程的理论研究一般需进行以下工作^[13]:①确定气力输送的基本流型,该流型受到气固两相物性、操作条件、过程环境等因素制约。②确定气力输送中气固两相流的浓度、黏度及密度,其浓度又包括体积溶度和质量浓度。③确定单颗粒的基本属性,包括形状、尺寸、表面积等。④研究单颗粒的受力状况,确定单颗粒的阻力系数,一般使用Kaskas阻力系数计算公式,即 $C_D = 24/Re + 0.4$,其中, C_D 为阻力系数, Re 为雷诺数。⑤确定多颗粒的受力状况,多颗粒是一个非常复杂的系统,需考虑颗粒之间以及颗粒与管壁之间的相互作用力。对于多颗粒系统来讲,单颗粒的阻力系数与流动系统的孔隙率相关,因此计算中一般简化将单颗粒的阻力系数乘以孔隙率的系数 ϵ 表示多颗粒的阻力系数,即 $C_D \times \epsilon^{-4.7}$ 。⑥确定颗粒的运动规律及流态化属性。

2.2.2 加压密相气力输送过程的试验研究

鹿鹏等^[14]研究了内蒙古、大同、兖州3种不同粒径煤粉的高压密相气力输送系统,考察输送压力、总输送差压、流化风流量、煤粉粒径和煤粉种类等因素对输送特性的影响。许盼等^[15]对2种煤粉在不

同外水下进行密相输送,研究煤粉表面性质和外水对流动特性的影响。沈湘林等^[16]建立了一个接收端压力3 MPa,输送压差可达1 MPa的高压密相气力输送试验系统,用 N_2 进行了干煤粉加压密相输送试验,研究了该系统作为干煤粉加压气化炉供煤装置的工作特性,包括输送稳定性、输送压差与煤粉输送速率及输送管中煤粉浓度的关系等。国内外学者对加压密相气力输送过程做了大量研究工作。但目前关于煤种和煤粉粒径分布对高压密相气力输送特性的影响研究还较少。为全面了解煤粉特性对高压密相煤粉气力输送特性的影响,需进行不同煤种和不同平均粒径煤粉的输送试验和理论研究。

3 干粉加压固体输送泵的发展方向

国内基于散体力学的固体输送泵技术的研究还未开始,国外关于这方面的研究也刚刚起步,处于探索阶段,还未形成完善、成熟的理论。根据国内目前工业需求提出以下发展方向。

1)调研国外最新研究进展,确定典型的Stamep Pump、PWR的XTL技术工业放大的瓶颈所在。

2)加强国内散体力学的相关理论、数值及试验研究,包括散体静力学,散体动力学的相关基础研究。

3)针对国内煤种进行相关基础研究,研究不同煤种、水分、粒径等相关参数与摩擦系数之间的函数关系,确定Stamet Pump及PWR针对国内煤种所能提供的最大输出压力。

4)基于散体力学及煤种属性的深入研究,开发具有我国自主知识产权的固体输送泵技术,针对Stamep Pump、PWR的XTL技术提出切实可行的放大解决方案。

参考文献:

- [1] 徐红东,门长贵.气流床加压气化进料技术的现状及发展趋势[J].煤化工,2007(5):13-16.
- [2] 陈智,许世森,刘刚,等.新型煤粉加压密相输送系统试验研究[J].热力发电,2013,42(5):42-45.
- [3] 张东亮.干法进料加压粉煤气化制合成气[J].煤化工,1996(4):24-30.
- [4] Aldred D, Saunders T. Continuous metered injection of coal into gasification and PFBC system operating pressures exceeding 38 Bar (560 PSI) [C]//International freiberg conference on IGCC and XTL technologies. Saxony: [s. n.], 2005:16-18.

(下转第11页)

4)若弧形筛长时间停用,应打开给料箱的检查口,清除节流板上矿物,以免淤结,影响下次使用。

5)定期检查节流板的保护层是否磨损脱落,筛面是否磨损堵塞等。

3 效益分析

斜沟煤矿选煤厂年入选原煤 1500 万 t,粗煤泥量占混煤产率的 7% 左右,粗煤泥水分由 14% 降至 10%,混煤水分降低 0.2%,发热量增加 0.48 MJ/kg,提高了混煤综合产率^[9]。混煤产率按 60% 计算,每年可减少铁路无用运输 1.8 万 t。铁路运费、装卸费等为 180 元/t,每年可节省运费 324 万元。

弧形筛改装成振动击打弧形筛后,脱水效率得以提高,降低了后续离心机负荷,节省了筛篮磨损更换费用。每台离心机每年可节省筛篮 6 个,全厂共 8 台离心机,每年共节省筛篮更换费用 48 万元。

4 结 语

弧形筛改装成振动击打弧形筛后,脱水效率更高,运行可靠,操作简单,维护方便,解决了传统弧形

筛脱水效率差的弊端。离心机工作状况得到改善,满足了客户对产品指标的要求,提高了混煤综合产率,降低了铁路运输成本,提高了市场竞争力,经济效益可观。

参考文献:

- [1] 顾庆丰,鲍玉新. 振动弧形筛的应用及技术革新[J]. 煤矿机械,2009,30(6):142-143.
- [2] 杜力,姚军民. 石壕矿选煤厂降低介耗的措施[J]. 河北能源职业技术学院学报,2011(3):80-81.
- [3] 赵宇. 普通弧形筛在葛泉矿洗煤厂的实际应用[J]. 企业导报,2013(10):297.
- [4] 谢广元,解京元,李文林,等. 选煤厂产品脱水[M]. 2版. 徐州:中国矿业大学出版社,2008:24-28.
- [5] 潘月军. 补连塔选煤厂弧形筛改造与应用[J]. 中国科技教育:理论版,2013(3):21-22.
- [6] 邓晓阳,周少雷,解京选,等. 选煤厂机械设备安装使用与维护[M]. 2版. 徐州:中国矿业大学出版社,2008:89.
- [7] 刘军. 弧形筛在哈拉沟洗煤厂的作用及存在问题的研究[J]. 中国新技术新产品,2008(10):102.
- [8] 程志红,王建波. 开拓选煤厂弧形筛的改造[J]. 煤炭加工与综合利用,2010(9):16-18.
- [9] 虞继舜,戴中蜀,何选明,等. 煤化学[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:61-62.
- [10] 匡世波. 基于离散单元法气力输送的数值模拟研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.
- [11] 彭小敏,朱立平,袁竹林. 煤粉粒径对密相气力输送流型影响的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(4):373-383.
- [12] 梁财. 高压超浓相煤粉气力输送流动特性研究[D]. 南京:东南大学,2007.
- [13] 郝晓琳. 气力输送系统中粉料流动机理及实验研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2006.
- [14] 鹿鹏,陈晓平,梁财,等. 不同煤粉高压密相气力输送特性实验研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(5):16-20.
- [15] 许盼,陈晓平,梁财,等. 不同外水含量下煤粉高压密相输送试验研究[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1359-1363.
- [16] 沈湘林,熊源泉. 煤粉加压密相输送实验研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):103-107.
- [11] 李哲,边炳鑫,何京东. 磁化技术对煤泥水处理工艺影响的研究[J]. 黑龙江矿业学院学报,1998,8(3):6-8.
- [12] 贾亮,李真,贾绍义. 磁化技术在工业水处理中的应用[J]. 化学工业与工程,2006,23(1):59-64.
- [13] 曹雨平,邓阳清,刘亚凯. 磁分离技术处理油污污染地下水的实验研究[J]. 磁性材料及器件,2011,42(1):59-62.
- [14] 吴春笃,段明飞,解清杰. 磁絮凝法处理泵站溢流污水试验研究[J]. 水处理技术,2011,37(6):38-49.
- [15] 常青. 水处理絮凝学[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2011:6-48.
- [16] 赵志强. 煤泥水的磁处理[J]. 选煤技术,1999(4):13-14.
- [17] Hu Yang, Liu Lingyun, Min Fanfei, et al. Hydrophobic agglomeration of colloidal kaolinite in aqueous suspensions with dodecylamine[J]. Colloids and Surfaces A: Physic Chemical and Engineering Aspects, 2013, 434(10):281-286.
- [18] 吕玉庭,赵颖颖,时起磊. 磁场对煤泥水絮凝沉降效果的影响[J]. 黑龙江科技学院学报,2013,23(5):424-427.
- [19] 李建军,朱金波,张丽亭,等. 磁选技术在水污染治理中的应用[J]. 水处理技术,2012,38(7):9-13.

(上接第4页)

(上接第8页)

- [5] Rosin A, Schroder H W, Repke J U. Briquetting press as lock-free continuous feeding system for pressurized gasifiers[J]. Fuel, 2014, 116:871-878.
- [6] 夏支文,井云环. CO₂ 作为密相输送载气在 GSP 气化技术中的应用[J]. 洁净煤技术,2012,18(5):49-51.
- [7] Coperion K-Tron. Bulk solids pump[EB/OL]. [2014-10-10]. <http://www.ktron.com/process-equipment/feeders/feeding-equipment/bsp-technology.cfm>.
- [8] 吴家桦,陈鹏,王晓亮,等. 煤粉高压密相气力输送技术研究现状与前景展望[J]. 东方电气评论,2013,27(4):27-34.
- [9] Zenz F A, Othmer D F. Fluidization and fluid-particle systems[M]. New York: Reinhold, 1960.