

城市污泥的特性及管道输送技术研究

吴 淼¹ 赵学义¹ 潘 越^{1,2} 苏明辉¹ 尤福祯³

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083; 2. 河北工程大学机电工程学院,邯郸 056038;
3. 河北沧州通用机械有限公司,沧州 061001)

摘 要 城市脱水污泥常见的处置方式是焚烧、燃烧发电、堆肥后土地化利用和填埋等。无论采用哪种无害化、资源化处置方法,输送环节都是必不可少的。城市污泥管道输送技术是以管道输送设备为核心,融合城市污泥的预处理和处置工艺的集成化系统。通过对城市污泥的流变特性和输送特性实验测试,其流变方程符合幂定律关系式;通过环管实验拟合出了污泥在管道中的阻力损失与输送距离和输送流量之间的关系,经验证,其理论计算和实际测定基本相符,证明管道输送方式能够成功地应用于城市污泥的远距离输送,为城市污泥管道输送系统的优化设计提供了理论依据。

关键词 城市污泥 流变特性 管道输送 输送设备

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)02-0260-06

Research on characteristics of municipal sewage sludge and its pipeline transportation technology

Wu Miao¹ Zhao Xueyi¹ Pan Yue^{1,2} Su Minghui¹ You Fuzhen³

(1. School of Mechanical Electronic Information, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083;
2. Hebei University of Engineering School of Mechanical Electronic, Handan 056038;
3. Hebei Cangzhou General Machine Ltd., Cangzhou 061001)

Abstract At present, the common disposal means of municipal sewage sludge (MSS) are burning after being dehydrated, combustion to generate electricity, dunghill for soil and burying. No matter which clean and harmless disposal way is used, the transportation of MSS is necessary. This paper introduces the transport technology of MSS. It focuses on the pipeline transportation devices and combines the integrative system of the pre-treatment and disposal for MSS. According to the experimental testing of the sludge's rheological characteristics and transportation properties, its rheological equation is accordant with Power law relations. By the cycling pipeline experiment, the relationship between pressure drop and distance during the pipeline & the flux is fitted. Experimental computation approximately match closely with engineering practice, which indicates that the way of pipeline transportation can successfully apply to remote transportation of MSS, and provide a theoretical basis for the optimum design of the pipeline transportation system for MSS.

Key words municipal sewage sludge; rheological property; pipeline transportation; transport device

据资料介绍^[1],目前我国城市污水处理厂每年排放的污泥量(干重)大约为130~420万t(折合成含水率80%的污泥为650~2100万t),年增长率大于10%,在城市化水平较高的城市与地区,污泥出路问题已十分严重。若城市污水全部得到处理,将产生污泥量(干重)840万t(折合成含水率80%的污泥为4200万t)。

污泥处置的主要方法有填埋、焚烧、燃烧发电和土地资源化利用。目前国内污泥处置方式简单,有的污水处理厂甚至将未处理的湿污泥随意外运、简单填埋或堆放,造成严重的空气污染,并给生态环境

带来安全隐患^[2]。

无论采取何种方式处理处置城市污泥,管道输送是避免二次污染的最佳选择。在煤矿,管道输送煤泥进入锅炉燃烧发电技术的应用已经成熟,管道输送城市污泥进入锅炉燃烧技术在个别城市已经开

基金项目:科技部科技型中小企业创新基金资助项目(20021104021799);教育部博士点专项基金资助项目(20020290011)

收稿日期:2007-08-06; **修订日期:**2007-10-20

作者简介:吴淼(1958~),男,博士,教授,主要研究方向:粘稠物料管道输送,机电设备故障检测等。

E-mail: wum@cumt.edu.cn

始试用,并取得了较好的经济效益和社会效益,因此,管道输送污泥技术的推广应用是保护环境、节约能源的重要方式之一。

1 城市脱水污泥的理论研究

1.1 污泥的流变特性及流变方程

城市脱水污泥的特点是浓度高、颗粒细、粘度高、流动性差,含有大量的纤维,为絮状胶体结构,不易脱水,含水率 80% 以上,属于均匀高固多相流体的范畴,具有一定的发热量。

通过对北京某污泥样本的粘度测试,结果为假塑性流体,如图 1 和图 2 所示。其流变方程和粘度表达式如表 1 所示。

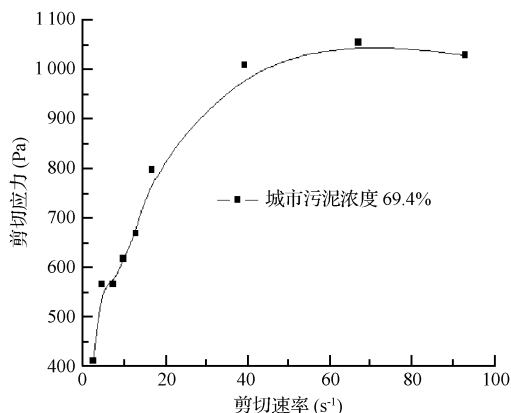


图 1 城市脱水污泥的流变特性曲线

Fig. 1 Rheologic property curve of municipal sludge

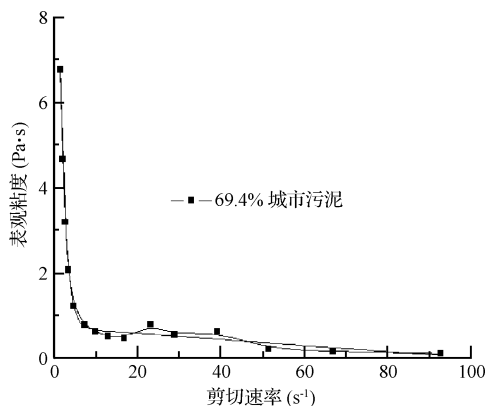


图 2 城市脱水污泥表观粘度曲线

Fig. 2 Viscosity curve of Beijing municipal sludge

上述测试结果表明,城市脱水污泥属于非牛顿流体,随着剪切速率的增加,粘度值呈下降的趋势,即提高剪切速率可以达到降低粘度的目的,该结果

为脱水污泥的管道输送实现提供了理论依据。

表 1 城市污泥流变特性方程

Table 1 Rheological equation of municipal sludge

项 目	城市脱水污泥
含水率 (%)	31.6
流变类型	假塑性流体
流变方程	$\tau = 365.5 \dot{\gamma}^{0.254}$
粘度表达式	$\mu_e = 34.04 (1 + \dot{\gamma})^{-1.83}$

1.2 污泥的粒度特性及粒度方程

1.2.1 颗粒粒度分布及其表示方法

表征物料粒度分布常用的方法有列表法、作图法和函数法^[3],分别称为粒度分布表、粒度分布曲线和粒度分布函数。

(1) 列表法

列表法是将粒度分析得到的原始数据及由此计算的数据列成表格即可,其优点是通过列表能表示出各粒级的分布情况,列表后的数据可以作为其他表示法的基础资料。列表法的不足之处是当数据量大时,列表非常麻烦,而且表中数据不连续。

(2) 作图法

作图法是根据测试物料的的粒径绘制的颗粒分布图,常用的有矩形图、密度函数图(频率分布图)、分布函数图。

矩形图优点是可一目了然地看出各粒级的变化及主导级别等情况;缺点是非连续分布,无法完整地反映粒级的粒度特性。

密度函数图来自概率分布,是通过数学方法确定的粒度颗粒频率范围内各级的相对百分含量等。

分布函数图也称作累积分布曲线,当统计大于某粒径 D' 的百分数时,表示正累积分布曲线,用 $R(D)$ 表示;小于某粒径 D' 的百分数表示负累积曲线,用 $F(D)$ 表示。

$$R(D) = 100 - F(D) \\ = \int_D^{D_{\max}} f(D) dD = 100 - \int_{D_{\min}}^D f(D) dD \quad (1)$$

曲线的斜率就是密度分布函数,即:

$$F'(D) = \frac{dF(D')}{d(D)} = f(D) \quad (2)$$

(3) 函数法

函数法是用数学方法将物料粒度分析数据归纳、整理并建立能反映物料粒度分布规律的粒度特性方程,然后进行统计分析、数学计算和计算机

处理。

1.2.2 颗粒粒度分布数学模型

从统计规律上来讲,概率密度函数 $f(x)$ 和累积分布函数 $F(x)$ 之间的关系为:

$$F(x) = \int_0^x f(u) du \quad (3)$$

而且满足: $0 \leq f(x) \leq 1$

$$F(0) = 0, F(\infty) = 1$$

对于常见的物料有以下几种模型^[3,4]:

(1) 正态分布

对于某些气溶胶和经沉淀法制得的粉末,其颗粒个数的分布规律近似符合正态分布,其概率密度函数为:

$$f(D) = \frac{dF}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(D - D_{\text{mean}})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

函数中的两个参数:平均粒径 D_{mean} 与标准偏差 σ 完全决定了颗粒的粒度分布。

(2) 对数正态分布

许多粉体物料的粒度组成服从对数正态分布,其密度函数数学表达式为:

$$f(\lg D) = \frac{dn}{d(\lg D)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \exp\left[-\frac{(\lg D - \lg D_g)^2}{2 \lg^2 \sigma_g}\right] \quad (5)$$

分布函数式:

$$F(\lg D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \int_{\lg D_{\min}}^D \exp\left[-\frac{(\lg D - \lg D_g)^2}{2 \lg^2 \sigma_g}\right] d(\lg D) \quad (6)$$

式中: D_g —几何平均直径;

σ_g —几何标准偏差。

(3) 罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布

罗辛-拉姆勒分布简称为 RRSB 方程,它实际上是一种概率分布函数,其累积分布函数的表达式为:

$$R(D) = 100 \exp\left[-\left(\frac{D}{D_e}\right)^n\right] \quad (7)$$

式中: $R(D)$ ——正累积产率, %;

D ——粒度;

D_e ——临界粒度,即 $R(D) = 36.8\%$ 或 $F(D) = 63.2\%$ 时对应的粒度;

n ——均匀系数,表示粒度范围宽窄。

对上述方程两边倒数取二重对数得:

$$\lg \lg \frac{100}{R(D)} = n \lg D - n \lg D_e + \lg \lg e = n \lg D + K \quad (8)$$

以 $\lg \lg \frac{100}{R(D)}$ 为纵坐标,以 $\lg D$ 为横坐标,得到

一条斜率为 n 的直线,截距为 K 。由 $R(D) = 36.8\%$ 处可得 D 。

(4) 盖茨-高登-舒兹曼模型

该模型即 Gates-Gaudin-Schuhmann 模型,简称为 GGS 模型。

当颗粒度满足这种分布规律时,颗粒粒度为 D 的筛下余量 $F(D <)$ 为:

$$F(D <) = \left(\frac{D}{D_L}\right)^N \quad (9)$$

式中: D_L 为颗粒体系中的最大颗粒粒径, N 为反映颗粒离散度的特征分布参数。

(5) Alfred 模型

Alfred 粒度分布模型是在 GGS 模型的基础上改进而来,其颗粒粒度为 D 的筛下余量 $F(D <)$ 满足:

$$F(D <) = \frac{D^N - D_s^N}{D_L^N - D_s^N} \quad (10)$$

式中: D_s 为颗粒体系中的最小颗粒粒径。

除上述模型外,还有独立模式分布,非完整的截断正态分布等。

1.2.3 污泥的颗粒粒度分布模型

城市脱水污泥成分复杂,既含有直径不等的颗粒、粘粒,又含有大量的纤维物质,对其粒径测试比较困难,因此,研究颗粒分布规律和对物料性质的影响,找出影响规律,最终为高浓度粘稠物料的管道输送提供理论依据。

图3是北京某污泥的粒度分布图。

由图3可知,城市污泥基本属于单峰分布,并且粒径集中在 $800 \sim 1\,000 \mu\text{m}$, 占总颗粒数的 64% , 且呈正态分布,粒径在 $400 \sim 600 \mu\text{m}$ 之间的颗粒约占 10% 。

污泥的分布特征表明,由于存在大小颗粒和粘粒,因此,污泥具有较好的保水性能,不易沉积,流变特性稳定,非常适合管道输送。

图4为城市污泥 Rosin-Rammler 分布曲线。

污泥的颗粒粒度 Rosin-Rammler 分布方程:

$$\lg \lg \frac{100}{R(D)} = 1.04802 \lg D - 3.55947 \quad (11)$$

拟合直线可信度 $R = 0.98885$, 方差 $SD = 0.06764$ 。

图5为城市污泥 GGS 分布曲线。

颗粒粒度 GGS 分布方程:

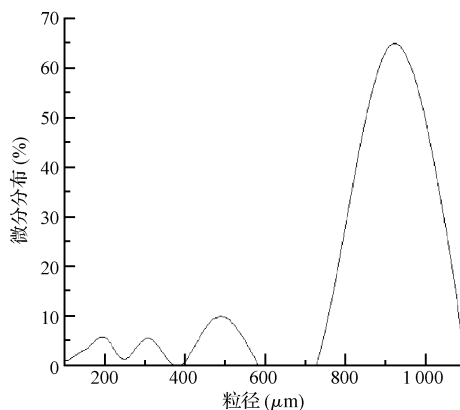


图3 城市污泥粒径分布曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve of city sludge

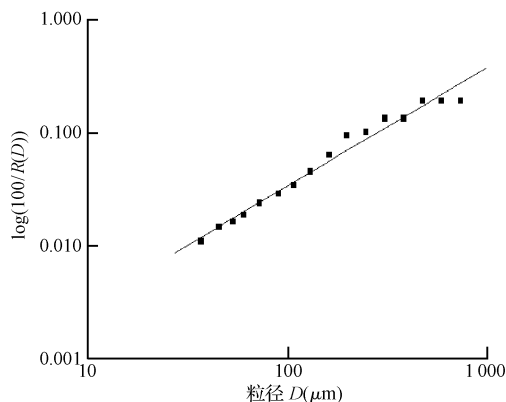


图4 城市污泥 Rosin-Rammler 分布规律

Fig. 4 Rosin-Rammler distribution regularity

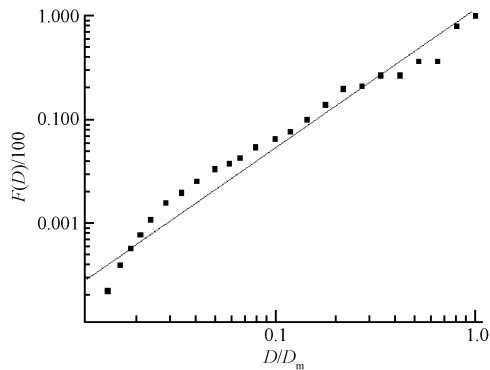


图5 城市污泥 GGS 曲线

Fig. 5 GGS curve of city sludge

$$\lg \frac{F(D)}{100} = 1.33769 \lg D - 3.9534 \quad (12)$$

拟合直线可信度 $R = 0.96886$, 方差 $SD = 0.20672$ 。

比较上述两种分布规律, Rosin-Rammler 分布更接近真实值。

2 城市污泥的远距离管道输送实验研究

为了开展城市污泥的管道输送实验研究, 中国矿业大学(北京)专门建设了国内惟一的粘稠物料管道输送实验室。该实验室占地面积约 400 m^2 , 建有一套闭式循环管路系统, 管路长度 153 m , 管路内径 $\phi 125 \text{ mm}$ 和 $\phi 100 \text{ mm}$ 。整套实验装置由搅拌系统、液压动力系统、输送泵、管路、截止阀、压力测试与采集装置等组成^[5], 实验系统如图6所示。

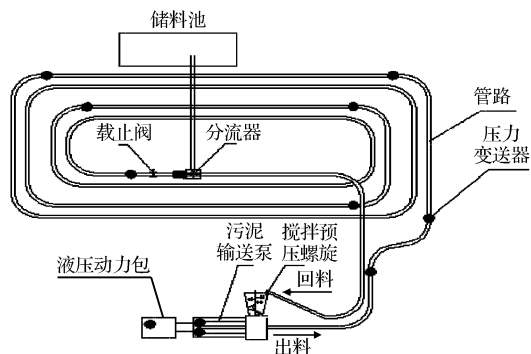


图6 实验系统示意图

Fig. 6 Sketch map of experimental system

2.1 管道输送实验系统的作用

该实验系统的主要作用是测试高浓度粘稠物料(包括城市污泥、造纸污泥、煤泥、电石泥、赤泥和油泥等)管道输送阻力损失、测定输送系统功率, 分析系统参数(管径、管长、管壁表面状态、流量、压力、阻力、弯管曲率、电压和电流等)和物料参数(如浓度、密度、颗粒成分、粒径和流态等)之间的关系, 并建立相关参数间的数学模型, 最终为管道输送系统工业化应用和优化设计提供理论基础。

2.2 污泥的管道输送实验

以合肥某污泥输送为例, 分析实验室管道输送特性和污泥的管道流变特性。

2.2.1 输送系统参数

设备参数: 电机功率 90 kW ; 油泵压力 31.5 MPa ; 泵最大出口压力 18 MPa 。

管路参数: 输送管路长度 153 m ; 管路内径 $\Phi 125 \text{ mm}$ 。

污泥含水率: 83.26% 。

2.2.2 实验曲线

根据实验测试数据, 绘制实验曲线如图7所示。

图7压力曲线表明, 管道内不同点的压力不同, 接近管道出口处压力最低, 而不同的输送速度压力

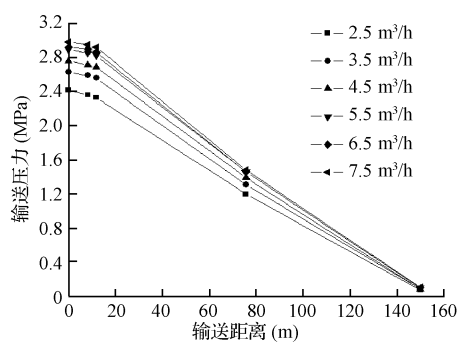


图7 输送距离与管道压力关系曲线

Fig. 7 Curve of relation between distance and pressure drop

也有变化,当输送量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 泵出口压力为 2.45 MPa ; 输送量为 $7.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 泵出口处压力为 3.0 MPa , 管道内的压力降基本呈线性变化。

利用多项式拟合的方法得出流量、距离与管道压力降三者之间的经验公式:

$$P = (2.2384 + 0.7341Q - 0.053Q^2) - (0.0131 + 0.005Q - 3.7 \times 10^{-4}Q^2)L \quad (13)$$

通过上式验证管道上的压力测点, 其误差精度小于 5% , 因此, 上述经验公式完全可用于实验室测试和工程应用。

2.2.3 影响管道输送因素分析

影响管道输送的参数有许多, 其一般表达式为^[6]:

$$P = f(L, Q, D, \lambda, \mu, c_w, d, T) \quad (14)$$

式中: P —管道输送压力; L —输送距离; Q —输送流量(速度); D —管路直径; λ —管壁粗糙度; μ —介质粘度; c_w —质量分数; d —颗粒粒径; T —环境温度。

由于目前对污泥的管道输送性能研究处于起步阶段, 没有现成的理论和公式可寻, 因此, 只能在试验研究的基础上得出管道输送的经验公式来指导工业生产和应用, 其他参数对输送系统的影响有待以后进一步研究。

3 管道输送技术在污泥处理中的应用

传统的污泥输送设备均属敞开式输送方式, 极易产生二次污染; 污泥处理所需的一些工艺环节如混合、搅拌、打散、布料、分流、流量控制等均难以融合在上述输送环节中, 致使污泥处理方法的实现存在很多困难, 加大了处理的难度。采用管道输送可以达到全密封无污染、安全可靠、运行成本低廉, 管道输送方式的实施, 几乎克服了传统输送方式的所有弊病。

3.1 污泥的远距离管道输送工艺

由于污泥的性质特殊, 除了含有大量有益的有机物和微生物外, 还有对环境、人畜和土壤有害的病菌和重金属等有毒废物, 所以污泥的后续处置方式主要有堆肥、填埋和焚烧。无论采用何种方式处置数量巨大的污泥废弃物, 通过管道将其远距离输送到合适的位置是必不可少的环节。图8~图11为基于管道输送的3种主要处理方式以及污泥储存、转载装车系统的示意图。

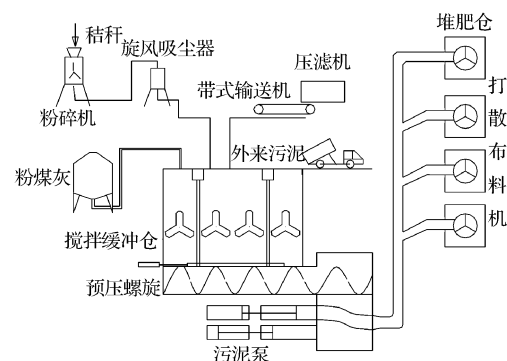


图8 城市污泥堆肥管道输送工艺流程图

Fig. 8 Pipeline transportation flow chart for compost techniques

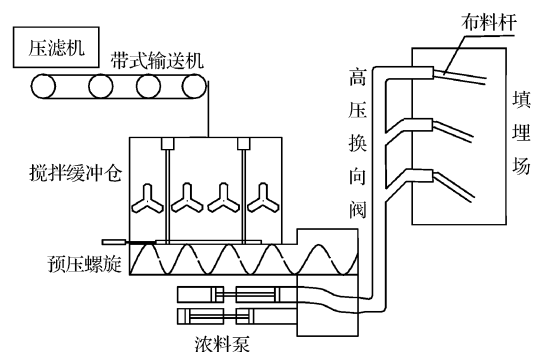


图9 城市污泥填埋管道输送工艺流程图

Fig. 9 Pipeline transportation flow chart for landfill

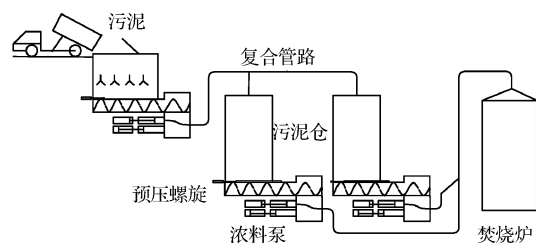


图10 城市污泥焚烧管道输送工艺流程

Fig. 10 Pipeline transportation flow chart for sludge incineration

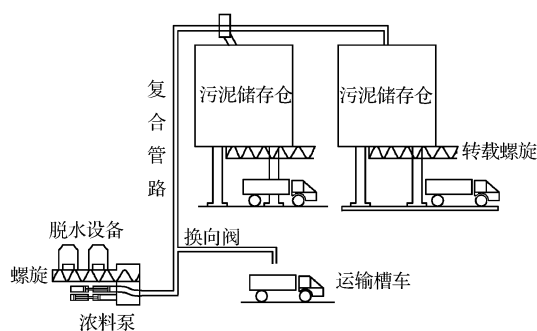


图 11 污泥储存、转载装车工艺流程图

Fig. 11 Flow chart of sludge deposit and transshipment

3.2 污泥管道输送系统特点

以管道输送设备为核心的污泥处理系统具有以下特点^[7]：

(1) 输送过程全封闭、无污染,完全消除了以往敞开输送方式严重污染环境的问题;

(2) 输送浓度高(可直接输送含水率 80% 左右的脱水污泥)、距离远(0 ~ 10 km)、压力大(0 ~ 24 MPa);流量大(5 ~ 70 m³/h),具有传统输送方式无可比拟的优越特性;

(3) 全自动控制,无级调控输送量,无人值守;

(4) 系统结构紧凑,管道可架空或地理、垂直上升及任意转弯,布置灵活,占地面积小;

(5) 污泥在管道中的分配、分流自动可调;

(6) 专门为堆肥发酵设计的打散布料器具有布料均匀、打散效率高等特点;专门为填埋设计的布料杆可以将污泥均匀送至填埋场的各个点;专门为污泥焚烧设计的多功能给料器可以适应各种燃烧器不同的物料入炉方式。

3.3 污泥管道输送系统设备及作用

用于污泥管道输送的主要设备如下:

(1) 污泥缓冲仓

污泥缓冲仓为方形结构,由仓体、布料滑架、液压站、液压缸等部件组成,实现污泥洁净储存。

(2) 闸板阀

用于设备检修时切断污泥缓冲仓与预压螺旋的通道,便于系统维护,采用液压传动方式。

(3) 预压螺旋

预压螺旋为污泥泵的辅助喂料设备,采用变频调速、双轴变螺距齿形结构,根据给料压力自动调整输送量。

(4) 浓料泵

采用闭式液压系统的新型 S 摆阀式双缸高压柱塞泵,具有出口压力大、输送距离远、输出量无级调节、出料稳定等优点。

(5) 高压低摩阻复合管

高压低摩阻复合管摩擦系数极低,使用寿命长,耐磨损、耐腐蚀、耐冲击;采用高压密封减震法兰和管路附件可有效吸收震动,密封可靠。

(6) 高压浓料换向阀和多功能给料器

由于污泥粘度大、流动性差,内摩擦阻力极高,常规方法无法进行流向切换和给料,该换向阀和给料器采用滑阀结构,液压驱动、动作准确。

(7) 布料杆

布料杆采用液压驱动,任意调节臂展长度和角度,实现大范围布料。

(8) 折叠管

折叠管由高压低摩阻复合管及活接头构成,伸缩自如,坚固耐用,回转阻力小,动作灵活。

4 结 论

污泥的远距离管道输送是一个刚刚起步发展的新兴的输送方式,其理论研究需要综合应用颗粒学、流变学、流体力学、摩擦学、浆体管道输送以及机械、自动控制、计算机等学科专业的知识,过去已有的研究成果并不多见,但这种输送方法因其优点众多必将会获得更多的应用,前景十分广阔。

参 考 文 献

- [1] 赵庆祥. 污泥资源化技术. 北京: 化学工业出版社, 2002. 2 ~ 3
- [2] 何晶晶, 顾国维, 等. 城市污泥处理与利用. 北京: 科学出版社, 2003. 70 ~ 73
- [3] 曾凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. 9 ~ 16
- [4] 王仁哲. 水煤浆颗粒粒度分布激光测试技术的研究[博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2005. 23 ~ 27
- [5] 吴森, 赵学义, 金赞, 等. 粘稠物料管道输送实验系统的设计与测试方法. 机电产品开发与创新, 2004, 17(4): 25 ~ 27
- [6] 赵学义. 高浓度粘稠物料可输送性分类与管道输送特性的实验研究[博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2005. 90 ~ 92
- [7] 吴森, 赵学义, 孙浩, 等. 污泥管道输送成套装备的应用. 中国给水排水, 2005, 21(6): 73 ~ 76