

柱塞式污泥泵送系统的主泵选型及技术探讨

苏志升¹, 陈志平¹, 蒙振净², 张甜甜², 郑理慎¹

(1. 广东省南方环保生物科技有限公司, 广东 广州 511400; 2. 广州中洲环保科技有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 柱塞式污泥泵送系统在国内的市政污泥输送领域已应用多年,并取得了良好的经济效益,但目前业界关于柱塞式污泥泵送技术的讨论甚少,尤其针对泵送系统的主液压泵选型的理论指导相对匮乏。根据多年的污泥储运工程应用经验,结合某工程实例,提出一种柱塞式污泥泵送系统的主泵选型计算方法并进行过程技术探讨,指出输送距离及输送排量与柱塞泵压力、功率、流量之间的关系。通过项目实际测试结果发现,计算值与现场监测值较好地保持一致,该方法可为脱水污泥等固废介质的柱塞泵送系统的主泵选型提供有效的理论依据。

关键词: 柱塞式污泥泵; 泵送系统; 主缸; 主泵

中图分类号: X705 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0113-05

Technical Discussion on Selection of Hydraulic Pumps in Sludge Pumping System

SU Zhi-sheng¹, CHEN Zhi-ping¹, MENG Zhen-jing², ZHANG Tian-tian², ZHENG Li-shen¹

(1. Guangdong Nanfang Environmental Protection Bio-technology Co. Ltd., Guangzhou 511400, China; 2. Guangzhou Middle and Environmental Protection Technology Co. Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: Sludge plunger pumping systems have been successfully implemented for many years in the field of municipal sludge transportation, and received substantial economic benefits. However, discussions about sludge pumping technology are quite limited, especially about the selection of the hydraulic pump. Based on years of experiences in the field of sludge storage and transportation, in combination with engineering cases, a methodology to select hydraulic pump was presented and related technology was discussed, to find out relationships between the conveying distance, the discharge volume, the pumping pressure, the power and the hydraulic flow. Field test results showed high level of consistence between monitored data and calculated values. This study provided a reference for hydraulic pump selection in dewatered sludge pumping and other solid waste pumping applications.

Key words: sludge plunger pump; pumping system; hydraulic cylinder; hydraulic pump

1 工程概况

某污水处理厂的污泥储运项目,污泥主要来源

于生活污水经沉淀并干化处理后的污泥(含水率为80%),污泥处理量为20 m³/h,管道输送总距离约

基金项目: 广东省科技计划项目(2014A010101089)

通信作者: 郑理慎 E-mail: zhenglishen@gdnfhhb.com.cn

100 m,过程输送管道高差达到14 m。该污泥储运项目的管道布置如图1所示。

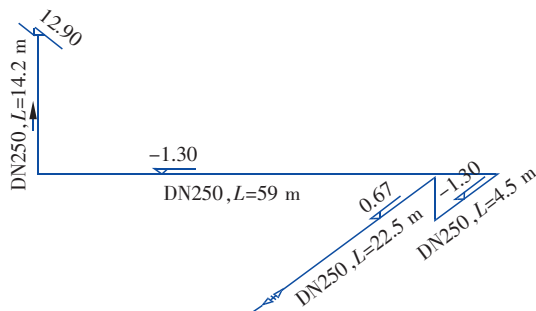
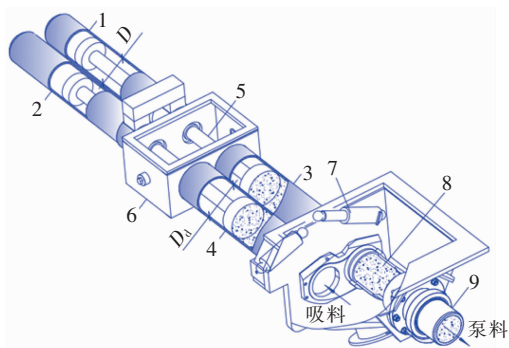


图1 某污泥泵送项目管道布置

Fig. 1 Piping layout of a sludge pumping project

2 关键参数的选定

柱塞式污泥泵是一种双缸推进结构(见图2),两主缸活塞杆通过中间连接机构分别与两输送缸活塞连接,摆缸机构驱使S摆管轮流与输送缸接合并形成送料通道,液压推动主缸工作腔,驱使输送缸活塞做往复运动,完成吸料与泵料的工作过程。



1.主缸 A 2.主缸 B 3.输送缸 A 4.输送缸 B 5.中间连接机构
6.冷却水箱 7.摆缸机构 8.S摆管机构 9.出泥口

图2 柱塞式污泥泵的结构示意

Fig. 2 Structure of sludge plunger pump

污泥泵送过程就是把主泵提供的液压能转换成活塞直线动能,即主泵的输出压力 P 、输出流量 Q 转换成污泥泵的输送压力 P_d 、污泥输出排量 Q_p 。

2.1 膏体充填管道输送阻力模型

关于污泥的管道流体特性,王劼等人^[1]曾提出关于膏体充填管道的输送阻力损失计算理论,得到了粘度、流速与输送阻力之间的关系。吴森等人^[2]针对脱水污泥进行试验性的研究,利用多项式拟合的方法得出了流量、距离与管道压力降三者之间的关系。结合陈志平等关于污泥管道阻力特性的研究成果[见式(1)]^[3],膏体充填管道的输送阻力损失

计算方式更适用于市政脱水污泥(含水率为80%左右)输送管道阻力损失的计算。

$$J_m = \frac{16}{3D} \times \tau_0 + \eta \times \frac{32v}{D^2} = 0.03 \text{ MPa/m} \quad (1)$$

式中, J_m 为管道沿程输送阻力,MPa/m; τ_0 为污泥屈服应力,取值1400 Pa; η 为塑性粘度,取值12 Pa·s; D 为管道内径,取值250 mm; v 为管道内平均流速,m/s。

2.2 柱塞式污泥泵的液压冲程频次

在额定的污泥泵送量工况下,污泥在输送缸内的流速将随着缸径减小而增大,但阻力和温度等因素却相应提高,从而增加系统功耗。图3为不同输送缸径(150、200、230、250 mm)下流速和流量的关系。可见,在既定的缸径条件下,污泥泵送在输送缸里的流速与流量成正比。流速随着流量的增加而增大,泵送阻力也随之增大。项目的污泥处理量为20 m³/h,属于中等排量等级,优选缸径为230 mm。

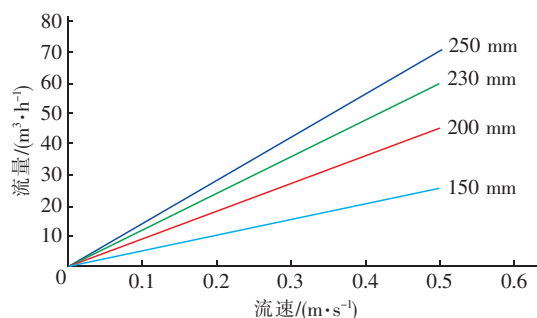


图3 不同缸径下流速和流量的关系

Fig. 3 Relationship between current speed and flow rate with different bore

柱塞泵每小时的泵泥量与输送缸单次泵送效率有关,即:

$$Q_d = \sum_i Q_i = \sum_i 60n \frac{\pi D_d^2}{4} L \eta_i \quad (2)$$

式中, Q_d 为柱塞式污泥泵的单位时间泵送量,即污泥排量,取20 m³/h; n 为柱塞式污泥泵的输送缸的工作频次,min⁻¹; D_d 为输送缸内径,0.23 m; L 为污泥输送缸的有效冲程,取1 m; η_i 为单次泵送过程中输送缸的容积效率,取平均值为70%。

由此可得:

$$n = \frac{4Q_d}{60\pi D_d^2 L \eta} = 12 \text{ 次/min} \quad (3)$$

柱塞式污泥泵通常采用双缸式来回泵送,输送量是单缸式输送缸的两倍,因此提高S摆管换向的

频率可显著提高泵送量。但由于污泥的高浓稠、高腐蚀特性,提高S摆管的换向频次将引起高发热量及严重的腐蚀磨损,降低设备使用寿命,一般柱塞式污泥泵的冲程次数不超过34次/min。

2.3 污泥输送缸的输送压力模型

影响污泥泵送阻力的主要因素是污泥与管壁间的摩擦阻力和污泥自身性质,当垂直泵送污泥时,泵送设备必须额外克服高差产生的垂直静压力,同时污泥的折弯管道会导致泵送阻力增加。表1为不同半径(R)、角度的弯管与水平直管的换算结果。

表1 弯管换算成直管结果

Tab.1 Conversion of elbow to straight tube

弯 管	直管/m
$R = 1 \text{ m}$	90°
	45°
	30°
	15°
$R = 0.5 \text{ m}$	90°
	45°
	30°
	15°

本项目中,污泥管道共计1组阀门(背压为0.2~0.3 MPa)和5个弯头(90°),根据表1,污泥输送缸输出压力可简化为:

$$P_d = (L + L_R) \cdot J_m + \rho g H + 0.2 = 3.83 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中, P_d 为输送缸输出压力(管道输入计算压力),MPa; L 为管道输送计算长度,100 m; L_R 为弯管折算成直管长度, $L_R = 5 \times 3 = 15 \text{ m}$; J_m 为污泥输送阻力,0.03 MPa/m; ρ 为污泥(含水率为80%)密度属性, $1.15 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$; H 为污泥输送管道的高差,按15 m计。

当向管道内壁注入0.5%的注膜减阻剂后,内壁形成的润滑膜可有效降低约20%的沿程压损^[4],则输送缸输出压力(管道输入压力)为:

$$P_d = 3.83 \times (1 - 20\%) = 3.1 \text{ MPa} \quad (5)$$

2.4 主缸输出压力

污泥输送缸上活塞的输送压力用以克服污泥的输送阻力,它由液动力站的输出油压作用在主缸活塞面积上所得的压力提供。从压力平衡的角度分析主缸缸和污泥输送缸的力平衡关系如下:

$$P_p \frac{\pi}{4} D^2 = P_m \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) + P_d \frac{\pi}{4} D_d^2 \quad (6)$$

式中, P_p 为主缸的输出工作压力,即主泵输出压力,MPa; D 为主缸的内径,设计主缸内径为140 mm; P_m 为双缸连通油路的压力,MPa; d 为活塞杆直径,80 mm; P_d 为输送缸的输出工作压力,3.1 MPa; D_d 为输送缸的内径,230 mm。

初选型号不需考虑油路、管路等因素对系统的影响,即 $P_m = 0$,因此,式(6)可简化为:

$$P_p = P_d \frac{D_d^2}{D^2} \quad (7)$$

由此,可求得主缸输出压力 $P_p = 8.3 \text{ MPa}$ 。

3 液压主泵的设计

柱塞式污泥泵的主油路工作压力为8.3 MPa。

3.1 主缸最大流量

当输送缸内活塞对污泥介质进行压实时,主缸压力很快上升,主缸的最大流量 Q_{\max} 为:

$$Q_{\max} = A \cdot V \quad (8)$$

式中, A 为主缸的截面面积, m^2 ; V 为主缸活塞的推送速度, m/s 。

主缸的工作速度比较线性、稳定,可按 $V = L/t$ 得到,其中 L 为主缸的有效冲程(m), t 为主缸完成单次冲程的时间(s),主缸的换向频率 $n = 12 \text{ min}^{-1}$,摆管、油缸换向等动作耗时按0.2 s核算。即:

$$V = \frac{L}{t} = \frac{1}{\frac{60}{12} - 0.2} = 0.21 \text{ m/s} \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 = \frac{1}{4} \pi \times 0.14^2 = 0.015386 \text{ m}^2 \quad (10)$$

则:

$$Q_{\max} = A \cdot V = 0.00323 \text{ m}^3/\text{s} = 194 \text{ L/min} \quad (11)$$

3.2 主泵输出流量

主泵提供柱塞式污泥泵执行元件的逻辑动作所需最大流量,核算液压泵所需排量时,应同时考虑系统的泄漏和容积率对工作所需流量的影响,因此,主泵的输出流量为:

$$Q \geq K(\sum Q_{\max}) \quad (12)$$

式中, K 为系统泄漏系数,一般为1.1~1.3,本系统取1.2; $\sum Q_{\max}$ 为同时动作的液压缸或执行元件的最大总流量,取194 L/min。则有:

$$Q \geq K(\sum Q_{\max}) = 1.2 \times 194 \text{ L/min} = 233 \text{ L/min} \quad (13)$$

3.3 主泵的工作压力

在项目实施过程中,为了防止管道污泥的反向惯性冲击、管道污泥多态性引起的泵堵等问题,保证泵送系统运行稳定,所选泵的额定压力一般比工作压力大20%~60%,使液压泵有一定的压力储备,该项目根据污泥泵送特性及系统结构,取 $(1+30\%)P$,则主泵的最大工作压力为:

$$P \geq (1+30\%) \cdot (P_p + \sum \Delta P) \quad (14)$$

式中, P_p 为主缸输出压力,8.3 MPa; $\sum \Delta P$ 为主泵出口到液压缸之间总的管路损失,对于简单油路,一般为0.2~0.5 MPa,复杂油路取0.5~1.5 MPa,此处,对于低泄漏量的柱塞式污泥泵液压回路,管损取0.3 MPa。则有:

$$P \geq 1.3 \times (P_p + \sum \Delta P) = 11.18 \text{ MPa} \quad (15)$$

3.4 确定主泵的功率

在柱塞式污泥泵送系统工作过程中,泵送压力随着泵送阻力的增大而增大,液压泵的功率也随之增大,因此在流量相对稳定的情况下,主泵的驱动功率为:

$$W = \frac{PQ}{60\eta_p} = 54 \text{ kW} \quad (16)$$

其中, P 为主泵的最大工作压力,11.18 MPa; Q 为主泵输出流量,233 L/min; η_p 为主泵总效率。

齿轮泵、螺杆泵、叶片泵、柱塞泵的总效率一般为0.6~0.7、0.65~0.80、0.60~0.75、0.8~0.85。综合设备维护及使用能效等因素,本系统的主泵优选柱塞泵,效率取0.8。

泵送功率是衡量系统泵送能力的重要设计参数,主泵在驱动泵送系统工作的同时,将分配一部分功率作液压系统的散热及摆缸换向动作的驱动,综合考虑其经济性,液压泵功率采用55 kW,完全满足项目所需工况要求。

3.5 主泵选型

根据《轴向柱塞变量泵 A10V(S)O 选型手册》,主泵可选择 A10VO140 斜盘式柱塞泵,其排量为140 cm³/r,流量为252 L/min,公称压力为28 MPa,适配驱动功率最高达98 kW(50 Hz)。图4为 A10VO140 斜盘式柱塞泵的驱动功率和流量随工作压力的变化特性(实线代表运行基频为1800 r/min,虚线代表运行基频为1500 r/min)。可知,柱塞泵在运行基频为1800 r/min的情况下,当驱动功率为55 kW时,最大工作压力达到12 MPa,排量为

248 L/min(1800 r/min)。工作压力是主缸输出压力(8.3 MPa)的1.4倍,根据公式(4)、(5)的输送压力模型及本项目的实际情况,在泵送系统密封良好的情况下,该柱塞式污泥泵送系统输送距离可达145 m,这是其他传统输送设备无法比拟的优势。

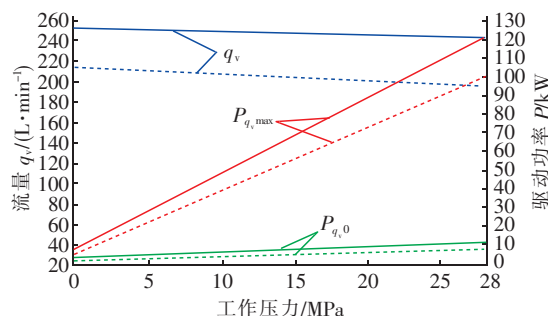


图4 A10VO140 的驱动功率和流量随工作压力的变化特性

Fig. 4 Power & flow feature correspond with a special working pressure of A10VO140 pump

3.6 现场应用对比

图5为柱塞式污泥泵送系统现场检测数据采集结果与计算结果的对比。A1、A3分别为泵送系统输入、输出压力计算值,A2、A4分别为泵送系统输入、输出压力监测值。可以看出,系统泵送压力曲线监测值均略低于计算值并趋于平行,数据偏差在10%以内,其中偏差较大的数据是由于泵送系统部分时刻处于非满载工作状态,其次系统良好的密封性也使得泵送过程的监测压力低于计算压力。

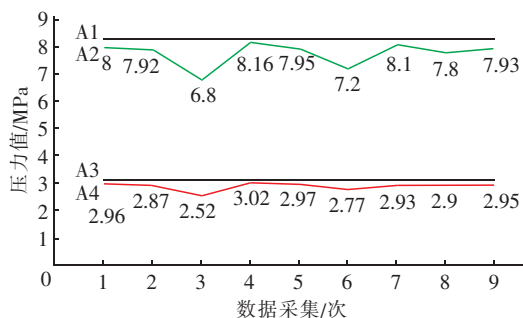


图5 现场测试数据与计算结果的对比

Fig. 5 Comparison of field test data and calculation result

4 结论

① 提出了一种基于污泥管道阻力模型的计算方法,现场测试与计算结果对比表明,液压主泵的选型有利于实现设备适配性,极大地满足了项目实际工况需求。本计算方法可作为柱塞式污泥泵送系统的理论指导,为高浓稠、高腐蚀等固废介质的远距离管道输送技术提供一定的参考价值,并且该系统适

用于市政污水污泥、工业废泥、矿下泥浆、建筑污泥等介质输送。

② 柱塞式污泥泵与混凝土泵的输送工艺相似,但有别于混凝土泵的主泵选型依据:混凝土泵采取改性混凝土介质成分降低阻力效应,采用较小口径实现超高层高排量,计算及选型偏向重工型泵送工艺;污泥泵通过减阻剂形成润滑膜降低沿程阻力,采用较大口径实现远距离高排量输送,计算及选型偏向工业型泵送工艺。

参考文献:

- [1] 王劼,杨超,张军,等. 膏体充填管道输送阻力损失计算方法[J]. 金属矿山,2010,39(12):33-36.
- [2] 吴森,赵学义,潘越,等. 城市污泥的特性及管道输送技术研究[J]. 环境工程学报,2008,2(2):260-265.
- [3] 陈志平,谢淮明,宋旭,等. 脱水污泥管道输送阻力计算模型对比研究[J]. 中国给水排水,2016,32(3):101-103.

- [4] 陆海,尹军,袁一星,等. 污泥管道输送沿程阻力影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):29-32.



作者简介:苏志升(1987-),男,广西贵港人,本科,副主任工程师,主要从事污泥、污水、恶臭及有机废气设备工程的研究及设计。

E-mail:Suzhisheng@gdnfhhb.com.cn

收稿日期:2016-08-19

(上接第112页)

- ing sites of extracellular polymers by linear programming analysis of titration data[J]. Biotechnol Bioeng,2002,80(7):806-811.
- [2] Martins A M P, Karahan O, van Loosdrecht M C M. Effect of polymeric substrate on sludge settleability[J]. Water Res,2011,45(1):263-273.
- [3] 张兰河,李军,郭静波,等. EPS对活性污泥絮凝沉降性能与表面性质的影响[J]. 化工学报,2012,63(6):1865-1871.
- [4] Pan X, Liu J, Zhang D. Binding of phenanthrene to extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic activated sludge: A fluorescence study[J]. Colloids Surf B Biointerfaces,2010,80(1):103-106.
- [5] 彭永臻,郭建华. 活性污泥膨胀机理、成因及控制[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [6] Magara Y, Numbu S, Uotosawa K. Biochemical and physical properties of an activated sludge on settling characteristics[J]. Water Res,1976,10(1):71-77.
- [7] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. Water Res,2001,35(2):339-350.
- [8] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify

spectra for dissolved organic matter[J]. Environ Sci Technol,2004,37(24):5701-5710.

- [9] 姚萌,罗红元,谢小青,等. 城市污水厂活性污泥胞外聚合物的三维荧光特性分析[J]. 中国环境科学,2012,32(1):94-99.



作者简介:梅哈古丽·艾尼瓦尔(1990-),女,维吾尔族,新疆吐鲁番人,硕士研究生,研究方向为污水生物处理。

E-mail:1606247661@qq.com

收稿日期:2016-11-21