

文章编号: 1674-599X(2021)03-0058-07

不同性质黏性土对泥浆渣土输送能力影响研究

杨光¹, 樊至¹, 吴智¹, 陈云², 周中², 刘撞撞²

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;

2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 依托泥水盾构机排浆工序原理, 设计了一种测量泥浆渣土输送能力的试验装置, 以泥浆管道流量作为评价泥浆渣土输送能力的指标, 对泥浆中不同类型黏性土的含量、输送距离和泥浆性能对泥浆渣土输送能力的影响进行研究。研究表明: 泥浆的渣土输送能力随着黏性土含量、输送距离、泥浆黏度和比重的增大而减弱, 并且相同材料配比下, 黏土泥浆的输送能力>混合泥浆的>膨润土泥浆的; 管道流量随着输送距离的增加, 膨润土泥浆的减小幅度>混合泥浆的>黏土泥浆的, 泥浆黏度相对比重的增大对降低泥浆管道流量的作用效果更为明显。该结果可为泥水盾构实际施工泥浆性能参数的选择提供参考。

关键词: 黏性土; 泥水盾构; 渣土输送能力; 泥浆性能

中图分类号: U452

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.009

Impact of clay properties on transport ability of mud residue

YANG Guang¹, FAN Zhi¹, WU Zhi¹, CHEN Yun², ZHOU Zhong², LIU Zhuang-zhuang²

(1. The Eighth Sinohydro Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the working principle of slurry discharge process of mud shield machine, the experimental device for measuring the residue conveying capacity of mud was designed. The mud pipeline flow was utilized to evaluate the residue transportation capacity of mud, and the impact of the content of different types solid material, distance of transportation and mud properties on residue transportation capacity was studied. It was found that the residue transport capacity decreased with the increase of the content of solid material, transport distance, mud viscosity and specific gravity. With the same proportion of material, the transport capacity of the following three can be ranked as follows: clay slurry> mixed slurry > bentonite mud. With the increase of conveying distance, the decrease of the pipeline flow can be ranked as: bentonite mud > mixed slurry > clay slurry. The effect of increasing mud viscosity is better than specific gravity on reducing mud pipeline flow. The results can provide reference for the selection of mud performance parameters in the construction of mud shield.

Key words: cohesive soil; slurry shield; residue transport capacity; mud property

盾构机是一种地下暗挖隧道施工的专用设备, 具有自动化程度高、速度快、安全性能高, 对周围的地层及建筑物扰动程度低等优点^[1-3]。其中, 泥水平衡盾构常应用在复杂地质条件下隧道施工, 特别是水下隧道工程。在泥水盾构隧道施工过程中

中, 泥浆环流系统稳定运转是盾构正常施工的必备条件之一, 因此, 必须选用合适的泥浆材料和配比确保泥浆性能^[4-5]。

泥浆的渣土输送能力是评价泥水盾构泥浆性能的重要指标。泥水盾构泥水仓中的泥浆与盾构

收稿日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908234); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4743)

作者简介: 杨光(1984—), 男, 中国水利水电第八工程局有限公司高级工程师。

刀盘切削下来的渣土混合后,由排浆泵输送到地表泥浆处理池进行泥浆渣土分离处理,随着盾构离工作井的距离不断增加,对排浆泵功率的要求也越高^[6-7]。张宁川等人^[8-9]对泥水盾构主机的推进速度与泥浆系统能力的匹配进行了阐述,认为盾构掘进的主要问题是泥浆输送系统。袁大军等人^[10]对含膨润土和不含膨润土两种泥浆进行了沉淀试验,从泥浆渣土输送和黏度两方面考虑,认为含有膨润土的聚合物泥浆要优于无固相泥浆的。黄波等人^[11-13]提出了减小管路磨损的技术措施和盾构改进技术。申智杰^[14]对狮子洋海底特长隧道中盾构环流系统包括泥浆输送系统的调节部分做了针对性设计。

目前,泥水盾构泥浆输送的研究主要集中在对盾构机改进,而泥浆黏性土含量对泥浆渣土输送能力影响的研究鲜见。因此,作者依托泥水盾构机排浆工序的原理,拟设计一种测量泥浆渣土输送能力的试验装置,以泥浆管道流量作为评价泥浆渣土输送能力的指标,对泥浆中不同类型黏性土的含量、输送距离、泥浆性能对泥浆渣土输送能力的影响进行研究,以期为泥水盾构施工泥浆参数的选择提供借鉴。

1 试验方案设计

1.1 试验装置

本试验所用仪器为烘箱、筛子、泥浆搅拌机、量筒和精密电子秤,还有自制的泥浆渣土输送能力测定装置,如图1所示。

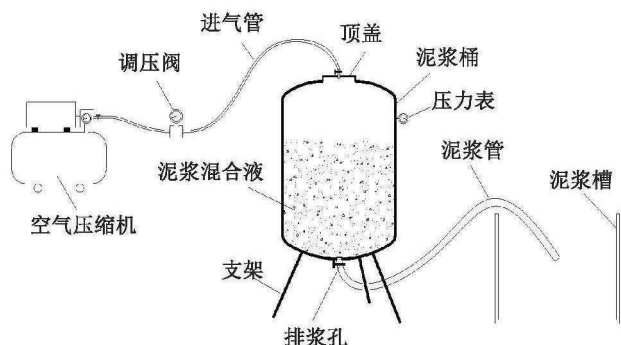


图1 泥浆渣土输送能力测试装置示意

Fig. 1 The test device for conveying capacity of mud residue

1.2 试验方案

1) 配置泥浆

分别以黏土、膨润土和二者混合物为原材料,并以材料的配比为变量,每组配置5 600 ml 泥浆,依次进行编号。

2) 砂土筛分

取天然河砂土,进行筛分、冲洗和烘干后,得到直径为0.25~0.5 mm的砂粒作为试验渣土,每组试验渣土掺入量为48 g。

3) 砂土泥浆混合

先打开泥浆渣土输送能力测试装置的泥浆桶,关闭出浆孔。再将配置好的试验组泥浆倒入泥浆桶中。然后用精密电子秤称取筛分好的48 g砂土倒入泥浆中,利用搅拌器将砂土均匀分散在泥浆中。最后紧封泥浆桶顶盖。

4) 泥浆渣土输送能力测试装置连接

首先利用进气管连接空气压缩机与泥浆桶,在进气管中间部位连接一个调压阀,保持泥浆桶内气压值的恒定。然后利用泥浆管的一端连接泥浆桶上的排浆孔,另一端放入泥浆槽中,盛放泥浆管中排出的泥浆砂土混合液。

5) 泥浆渣土输送能力测量

为模拟泥水盾构施工过程中排浆泵输送泥浆渣土混合液的过程,首先关闭泥浆桶上方进气孔的开关,打开空气压缩机,将调压阀调至设定的气压值。再打开进气孔开关,观察泥浆桶上压力表的读数,始终保持设定值。然后打开泥浆桶上的排浆孔开关,同时打开秒表进行计时,直到泥浆桶中的泥浆全部排出才停止计时。

6) 泥浆渣土输送能力评价

根据每组试验得到的泥浆砂土混合液排浆时间 t 、排浆量 Q 和排浆管直径 d ,计算泥浆管道流量值,直至完成此组泥浆输送能力的测量。

7) 下一组泥浆

重复以上步骤进行泥浆输送能力试验。

2 试验结果分析

2.1 黏土泥浆渣土输送能力试验

为研究黏土泥浆的渣土输送能力,并分析黏土材料配比和基本性能与泥浆渣土输送能力的关系。以黏土含量为变量,配置6组黏土泥浆进行泥浆渣土输送能力试验,材料配比见表1。

表1 黏土泥浆砂土混合液配比
Table 1 Mud mix ratio of clay and sand

材料 编号	清水/ml	黏土/g	碳酸钠/g	羧甲基 纤维素钠/g	砂土/g
NTNJ-1	5 600	160	16	8	48
NTNJ-2	5 600	320	16	8	48
NTNJ-3	5 600	480	16	8	48
NTNJ-4	5 600	640	16	8	48
NTNJ-5	5 600	800	16	8	48
NTNJ-6	5 600	960	16	8	48

各组黏土泥浆经过泥浆渣土输送能力试验所得到的结果见表2。不同输送距离时黏土泥浆管道流量随黏土含量的变化曲线如图2所示。

表2 黏土泥浆渣土输送能力试验结果

Table 2 Test results of transport capacity of clay mud residue

编号 参数	输送距离 2m		输送距离 4m		输送距离 8m	
	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)
清水	13.02	430.26	15.58	359.42	18.12	309.11
NTNJ-1	13.21	423.92	15.97	350.68	18.75	298.67
NTNJ-2	13.69	409.06	16.75	334.25	19.92	281.12
NTNJ-3	14.29	391.88	17.39	321.94	19.82	282.54
NTNJ-4	15.16	369.39	17.74	315.73	20.68	270.79
NTNJ-5	15.19	368.63	18.26	306.66	21.32	262.66
NTNJ-6	15.55	360.13	18.84	297.18	22.18	252.48

注:空气压力 30 kPa,等效扬程 3 m,泥浆量 5 600 ml,泥
浆管直径 16 mm

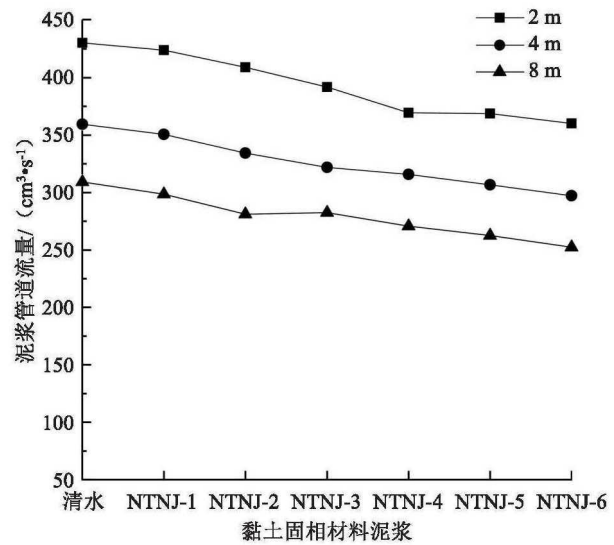


图2 黏土泥浆管道流量变化曲线
Fig.2 Flow curve of clay mud pipe

从图2中可以看出,当输送距离相同时,泥浆管道流量随泥浆中黏土配比的增大而减小,输送能力随之降低,但变化幅度较小;当输送距离不相同,泥浆管道流量随输送距离的增加而减小。表明:虽然黏土泥浆输送能力较强,但是泥浆悬浮能力较差,泥浆输送过程中携带渣土量较少,不利于渣土的输送,因此以黏土作为单一材料的泥浆并不适用于泥水盾构隧道的施工。

2.2 膨润土泥浆渣土输送能力试验

为研究膨润土泥浆的渣土输送能力,并分析膨润土配比和基本性能与泥浆渣土输送能力的关系。以膨润土含量为变量,配置6组试验,材料配比见表3。

表3 膨润土泥浆砂土混合液配比

Table 3 Mix ration of bentonite slurry and sand

材料编号	清水/ml	膨润土/g	碳酸钠/g	羧甲基 纤维素钠/g	砂土/g
PRTNJ-1	5 600	160	16	8	48
PRTNJ-2	5 600	320	16	8	48
PRTNJ-3	5 600	480	16	8	48
PRTNJ-4	5 600	640	16	8	48
PRTNJ-5	5 600	800	16	8	48
PRTNJ-6	5 600	960	16	8	48

各组膨润土泥浆经过泥浆渣土输送能力试验所得到的结果见表4。不同输送距离时泥浆的管道流量随膨润土含量的变化曲线如图3所示。

表4 膨润土泥浆渣土输送能力试验结果

Table 4 Test results of transport capacity of bentonite mud residue soil

编号 参数	输送距离 2 m		输送距离 4 m		输送距离 8 m	
	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm ³ ·s ⁻¹)
清水	13.02	430.26	15.58	359.42	18.12	309.11
PRTNJ-1	13.47	415.74	16.23	344.99	19.00	294.74
PRTNJ-2	14.94	374.83	18.63	300.51	22.61	247.73
PRTNJ-3	17.31	323.51	22.97	243.82	29.91	187.23
PRTNJ-4	19.43	288.21	27.76	201.73	39.91	140.32
PRTNJ-5	23.32	240.17	33.45	167.40	48.39	115.73
PRTNJ-6	27.07	206.87	43.33	129.23	75.57	74.10

注:空气压力 30 kPa,等效扬程 3 m,泥浆量 5 600 ml,
泥浆管直径 16 mm

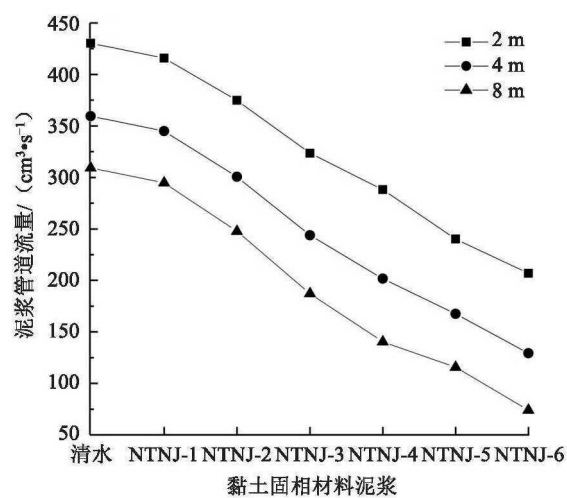


图3 膨润土泥浆管道流量变化曲线

Fig.3 Flow curves of bentonite slurry pipeline

从图3中可以看出,对于膨润土泥浆,当其他试验参数不变且输送距离相同时,泥浆管道流量随泥浆中膨润土配比的增大而减小,变化幅度较大,输送能力随之大幅度减弱;当输送距离不相同,泥浆管道流量随着输送距离的增加而减小。表明:虽然膨润土泥浆的渣土悬浮能力较强,但是泥浆管道流量较小,渣土输送能力差,不利于掌子面泥膜的形成。因此,以膨润土作为单一材料的泥浆也不适用于泥水盾构隧道的施工。

2.3 混合材料泥浆渣土输送能力试验

为研究黏土和膨润土混合材料泥浆的渣土输送能力,并分析泥浆混合材料配比和基本性能与泥浆渣土输送能力的关系。以混合材料含量为变量,配置6组试验,材料配比见表5。

表5 混合材料泥浆砂土混合液配比

Table 5 Mix ratio of mud-sand mixture

材料 编号	清水/ml	黏土/g	膨润土/g	碳酸钠/g	羧甲基 纤维素钠/g	砂土/g
HHNJ-1	5 600	160	160	16	8	48
HHNJ-2	5 600	320	320	16	8	48
HHNJ-3	5 600	480	480	16	8	48
HHNJ-4	5 600	640	640	16	8	48
HHNJ-5	5 600	800	800	16	8	48
HHNJ-6	5 600	960	960	16	8	48

各组混合材料泥浆经过泥浆渣土输送能力试验所得到的结果见表6。不同输送距离时泥浆的管道流量随混合材料含量的变化曲线如图4所示。

表6 混合泥浆渣土输送能力试验结果

Table 6 Test results of transport capacity of mixed mud residue

编号 参数	输送距离 2 m		输送距离 4 m		输送距离 8 m	
	输送 时间/s	管道 流量/ (cm³·s⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm³·s⁻¹)	输送 时间/s	管道 流量/ (cm³·s⁻¹)
清水	13.02	430.26	15.58	359.42	18.12	309.11
HHNJ-1	13.38	418.43	16.10	347.81	18.81	297.66
HHNJ-2	13.80	405.84	17.37	322.33	20.62	271.58
HHNJ-3	15.21	368.18	19.38	288.96	25.37	220.73
HHNJ-4	16.35	342.42	22.38	250.22	27.98	200.13
HHNJ-5	18.16	308.35	24.85	225.36	33.65	166.42
HHNJ-6	19.15	292.43	26.27	213.15	35.70	156.85

注:空气压力 30 kPa,等效扬程 3 m,泥浆量 5 600 ml,泥浆管直径 16 mm

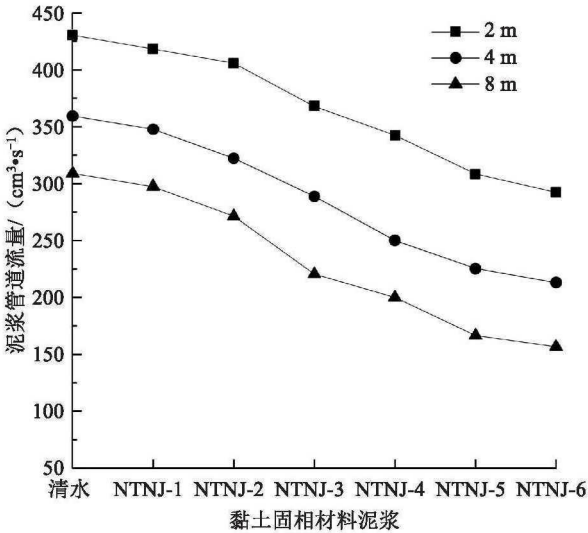


图4 混合材料泥浆管道流量变化曲线

Fig.4 Flow curves of mixed materials mud pipe

从图4中可以看出,对于黏土和膨润土的混合材料泥浆,当其他参数不变且输送距离相同时,泥浆的管道流量随着材料配比和输送距离的增大而减小。对于混合材料泥浆,膨润土可以提高泥浆的悬浮能力,黏土可以增大泥浆的比重,提供在掌子面形成致密泥膜所需的细土颗粒。在不同的地层中进行泥水盾构隧道的施工时,通过调整混合材料泥浆的配比,可以形成一种悬浮能力强,输送能力高,又能在开挖面形成致密泥膜的泥浆,因此,混合材料泥浆相对于黏土、膨胀土泥浆更适用于泥水盾构隧道的施工。

3 泥浆渣土输送能力分析

3.1 黏性土比对泥浆输送能力的影响

3 种材料泥浆在不同输送距离下，泥浆的管道流量随材料用量的变化曲线如图 5 所示。

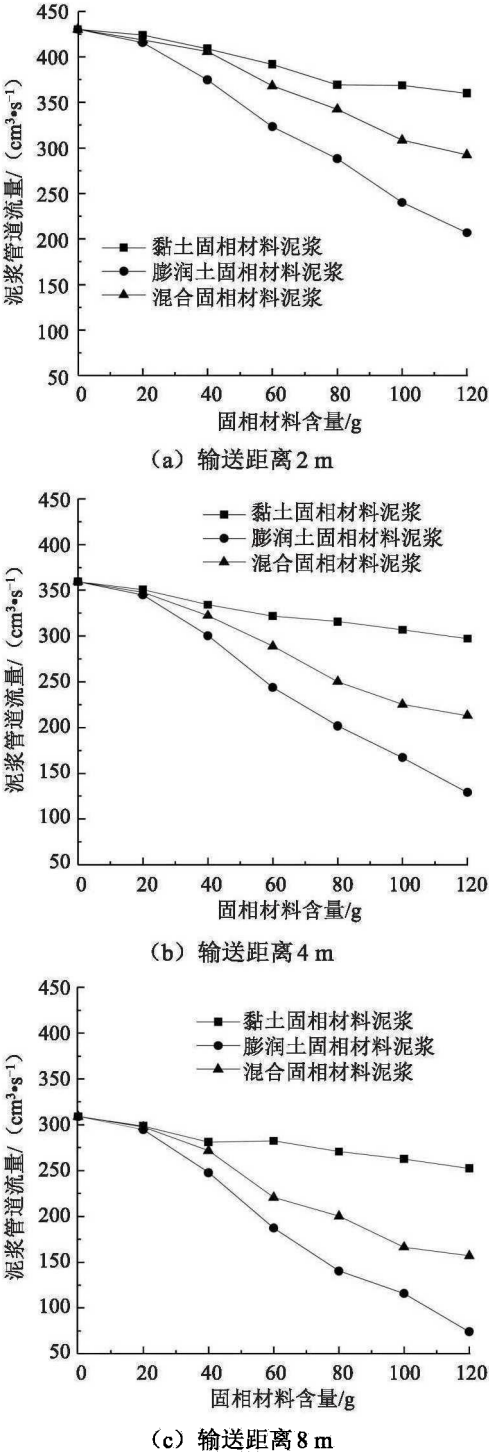


图5 泥浆管道流量随不同黏性土含量变化曲线

Fig.5 Curve of mud pipeline flow rate changing with content of clay

从图 5 中可以看出，输送距离相同时，泥浆的管道流量随不同性质的黏性土含量的增加而减小，膨润土对减小泥浆管道流量的幅度最大，混合材料的次之，黏土的最小，并且相同材料配比下黏土泥浆的管道流量>混合泥浆的>膨润土泥浆的。

3.2 输送距离对管道流量的影响

为研究泥浆管两端压力差相同情况下泥浆管道流量与输送距离的关系，建立 3 种类型泥浆的管道流量随输送距离的变化曲线如图 6 所示。

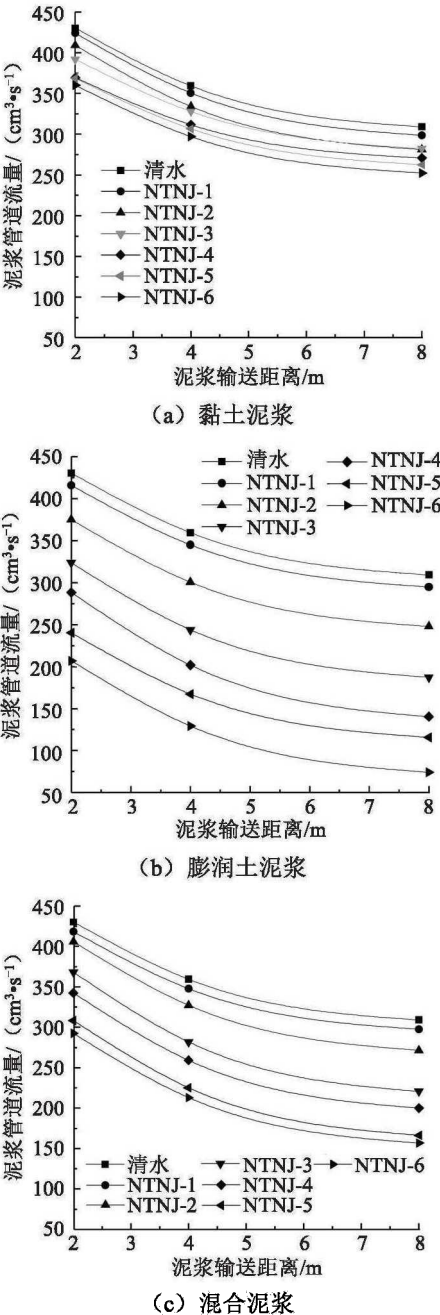


图6 泥浆管道流量随输送距离变化曲线

Fig.6 Curve of slurry pipeline flow rate changing with transport distance

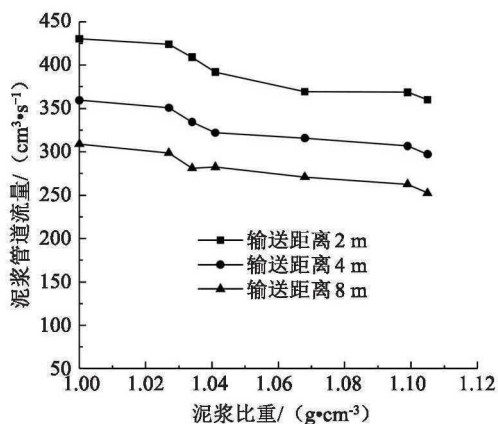
从图6中可以发现,泥浆的管道流量随输送距离的增大而减小,并且膨润土泥浆的减小幅度>混合材料泥浆的>黏土泥浆的。根据拟合曲线,可以得到泥浆的管道流量和输送距离的数学表达式为:

$$V = c\sqrt{\frac{1}{x}} \quad (1)$$

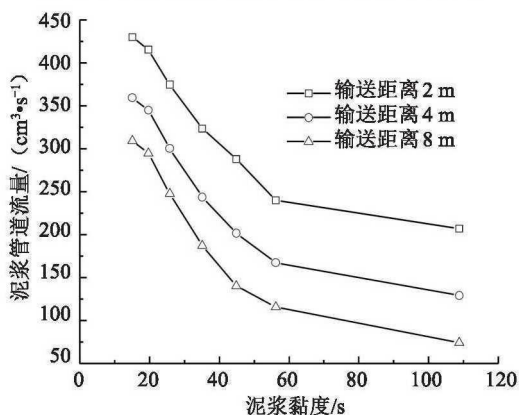
式中: V 为泥浆管道流量; x 为泥浆输送距离; c 为常数,与泥浆的性能、泥浆管参数及泥浆管两端压力差有关。

3.3 泥浆性能对管道流量的影响

黏土泥浆的比重随材料配比的增大而增大,而不同组泥浆的黏度差距较小。因此,以黏土泥浆为例,对泥浆管道流量与泥浆比重的关系进行分析,如图7(a)所示。对于膨润土泥浆,泥浆黏度随着材料配比的增大而大幅度增加,而泥浆的比重变化量减小。因此,以膨润土泥浆为例,建立泥浆管道流量与黏度的关系曲线图,如图7(b)所示。



(a) 黏土泥浆的比重对泥浆管道流量的影响



(b) 膨润土泥浆的黏度对泥浆管道流量的影响

图7 泥浆管道流量随泥浆性能变化曲线

Fig.7 Curve of mud pipe flow changing with mud performance

从图7中可以看出,随着泥浆黏度和比重的增大,泥浆管道流量均随之减小,但泥浆黏度增大对降低泥浆管道流量的作用效果较为明显,而比重对泥浆管道流量的影响相对较小。表明:黏土泥浆管道流量较大,但泥浆中悬浮渣土量较少,渣土输送效率较低,不适用于泥水盾构隧道的施工;膨润土泥浆虽然悬浮携带渣土能力较强,但是泥浆黏度较大,泥浆渣土混合液重度大,泥浆管道流量较小,输送能力低,泥浆泵负荷较大,导致泥浆环流系统工作效率低。然而对于混合泥浆,通过调整膨润土和黏土的配比,泥浆输送能力能达到设计要求,并且能在隧道掌子面形成一层致密泥膜,保障泥水盾构隧道全高效施工。

4 结论

采用泥浆渣土输送能力测量装置进行泥浆渣土输送能力试验,得出结论为:

1) 输送距离相同时,泥浆的管道流量随着黏性土含量的增加而减小,相同材料配比下黏土泥浆的输送能力>混合材料泥浆的>膨润土泥浆的。

2) 泥浆管道流量随着泥浆输送距离的增大而减小,并且膨润土泥浆的减小幅度>混合材料泥浆的>黏土泥浆的。

3) 泥浆黏度和比重的增大均会降低泥浆渣土输送能力,但泥浆黏度的增大对降低泥浆管道流量的作用效果较为明显,比重对泥浆管道流量大小的影响相对较小。

4) 混合材料泥浆可通过调整膨润土和黏土的配比,弥补单一材料泥浆的不足,使得泥浆的输送能力和悬浮能力均达到设计要求,该材料适合在泥水盾构隧道中施工。

参考文献(References):

- [1] 高延伟,翁子才,张照煌.盾构技术在隧洞施工中的应用分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(6): 502-507. (GAO Yan-wei, WENG Zi-cai, ZHANG Zhao-huang. Analysis of application of shield technology to tunnel construction[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(6): 502-507.(in Chinese))
- [2] 张健,周中,邢凯.盾构隧道近接施工对地层变形的影

- 响[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep soil displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 63-70.(in Chinese))
- [3] 吕英兰. 盾构机结构设计与应用[J]. 中国科技信息, 2019 (10): 71. (LYU Ying-lan. Design and application of shield machine[J]. China Science and Technology Information, 2019 (10): 71. (in Chinese))
- [4] 张恒. 盾构泥浆环流系统研究[J]. 建筑机械化, 2019, 40 (7): 56-58, 61. (ZHANG Heng. Study on the circulation system of shield mud[J]. Construction Mechanization, 2019, 40(7): 56-58, 61.(in Chinese))
- [5] 周志刚, 陈功鸿, 张红波, 等. 胶粉/高黏剂复合改性SBS沥青的性能与改性机理[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2020, 17(2): 1-9. (ZHOU Zhi-gang, CHEN Gong-hong, ZHANG Hong-bo, et al. Performance and modification mechanism of SBS composite modified asphalt by rubber powder/high viscosity agent[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(2): 1-9.(in Chinese))
- [6] 毛贤. 地铁隧道泥水盾构施工中的泥浆管理[J]. 建筑, 2014(5): 58-59. (MAO Xian. Mud management in mud shield construction of subway tunnel[J]. Construction and Architecture, 2014(5): 58-59.(in Chinese))
- [7] 李小飞. 泥水盾构泥水压力动态平衡自适应控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. (LI Xiao-fei. Research on adaptive control of dynamic slurry pressure balance in shield tunneling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese))
- [8] 张宁川. 泥水盾构主机推进速度与泥浆系统能力的匹配[J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 7-9. (ZHANG Ning-chuan. Matching between thrust speed of main shield machine and capacity of slurry system[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(6): 7-9.(in Chinese))
- [9] 曹建辉. 泥水盾构施工中泥水输送设备的配套[J]. 建筑机械化, 2012, 33(3): 88-89, 99. (CAO Jian-hui. Assorting with drainage mud water during slurry shield construction [J]. Construction Mechanization, 2012, 33(3): 88-89, 99. (in Chinese))
- [10] 袁大军, 李兴高, 李建华, 等. 北京地下直径线泥水盾构泥浆特性参数确定[J]. 建筑技术, 2009, 40(3): 279-282. (YUAN Da-jun, LI Xing-gao, LI Jian-hua, et al. Determination of mud and water characteristic parameters of slurry shield of Beijing underground straight rail traansit line[J]. Architecture Technology, 2009, 40(3): 279-282.(in Chinese))
- [11] 黄波, 李晓龙, 陈长江. 大直径泥水盾构复杂地层长距离掘进过程中的泥浆管路磨损研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(4): 490-496. (HUANG Bo, LI Xiao-long, CHEN Chang-jiang. Study of abrasion of slurry pipe of large-diameter slurry shield boring in complex strata[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(4): 490-496.(in Chinese))
- [12] 杨爱军. 气垫式泥水盾构的改进[J]. 中国高新科技, 2018 (24): 75-77. (YANG Ai-jun. Improvement of air cushion mud shield[J]. China High-tech, 2018 (24): 75-77. (in Chinese))
- [13] 伍超. 泥水平衡盾构泥浆特性及输送性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. (WU Chao. Study on mud characteristics and transportation performance of slurry balance shield[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [14] 申智杰. 狮子洋海底特长隧道泥水盾构针对性设计与工程实践[J]. 建筑机械, 2011(13): 101-105. (SHEN Zhi-jie. Pointed design and engineering practice of slurry shield machine for super length channel on lion ocean floor[J]. Construction Machinery, 2011(13): 101-105. (in Chinese))