

# 粉细砂地层中泥水平衡盾构的泥浆配比研究

董云涛<sup>1</sup>, 牛秀宝<sup>1</sup>, 董阔<sup>1</sup>, 黄君<sup>1</sup>, 崔振英<sup>1</sup>, 散骞骞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁建大桥工程局集团第二工程有限公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海

Email: 952968312@qq.com

收稿日期: 2021年4月1日; 录用日期: 2021年4月20日; 发布日期: 2021年4月27日

## 摘要

目前我国泥水盾构中使用的泥浆材料主要以膨润土为基础, 还存在各种聚合物复合膨润土、堵漏剂、增粘剂、分散剂、造浆剂等, 多达数十种, 由于泥浆配置是影响本工程掘进面稳定性的主要原因, 所以需要现场数据的采集及相关室内土工试验, 调整泥浆中水、膨润土、CMC、纯碱等的不同配合比, 确定盾构在细砂地层中掘削过程中的最佳泥浆配料, 以保证掘进面开挖过程的稳定。

## 关键词

粉细砂地层, 泥水平衡盾构, 泥浆配比, 泥浆成膜

# Study on Slurry Ratio of Sludge-Water Balance Shield in Fine Silty Sand Formation

Yuntao Dong<sup>1</sup>, Xiubao Niu<sup>1</sup>, Kuo Dong<sup>1</sup>, Jun Huang<sup>1</sup>, Zhenying Cui<sup>1</sup>, Qianqian San<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Second Engineering Company, China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group, Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Durability and System Safety of Rail Transit, Tongji University, Shanghai  
Email: 952968312@qq.com

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

At present, the mud materials are mainly used in the shield on the basis of bentonite. There are all kinds of polymer composite bentonite, plugging agent, viscosifier, dispersing agent, paste agent and so on, as many as dozens of. Because the mud configuration is the main reason affecting the stability of this engineering excavation face, I need through the field data collection and related

laboratory soil test, adjust the water in the mud, bentonite, CMC, soda ash and other different mixing proportion, determine the shield in the fine sand strata dug in the process of cutting the best mud ingredients, to ensure the stability of excavation face excavation process.

## Keywords

Fine Sand Formation, Mud-Water Balance Shield, Mud Ratio, Mud Film

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

21 世纪, 由于城市现有的可利用土地面积的减少, 为了解决地面空间和城市建设之间的紧张矛盾, 从而实现城市的可持续发展, 因此合理开发利用地下空间, 修建城市地下隧道势在必行[1]。

第四纪在地球地质发展历史中属于最新的阶段, 地壳外表面受到了内外地质力一个合成的作用, 从而形成了一系列与气候环境和地质构造相关联的第四纪堆积物。砂层是在第四纪地质时期形成的一种由粗碎屑组成的松散状的堆积层[2] [3]。Fritz [4]等(2007 年)针对瑞士采用泥水盾构在高渗透性地层( $k > 10^{-1}$  cm/s)修建隧道, 发现向泥浆中加入一定量较大粒径的细砂、蛭石以及高分子聚合物等添加剂, 可以满足泥浆在高渗透地层的成膜要求; 韩晓瑞[5]等(2008 年)针对南京纬七路长江隧道穿越砾砂地层, 采用自制的泥浆渗透装置开展的研究, 结果表明泥浆漏斗粘度越大, 形成泥膜的速度越快, 泥膜越致密, 泥膜形成后滤水量越小; 王春河[6] (2011 年)在南京纬七路长江隧道粉细砂段盾构施工中, 通过向淤泥质粉质粘土层废弃粘土浆中加入适量高分子材料和水, 实现了对淤泥质粉质粘土层废弃粘土浆的循环使用, 取得了良好的施工效果和经济效益。姚占虎[7]等(2013 年)采用竖井施工产生的填土、盾构始发段废弃的粘土和膨润土, 分别与泥浆增粘剂混合配浆, 使用自制的泥浆渗透仪测定泥浆的滤失量和成膜质量, 最后结合现场施工监测数据验证泥浆配比的可行性。结果表明, 采用始发段废弃的粘土泥浆配制的泥浆稳定性较好, 形成泥膜致密、泥浆失水量小, 能够满足粉细砂地层的盾构掘进。采用隧道开挖废弃的淤泥质粉质粘土, 再利用进行盾构掘进用泥浆的配制, 不仅能够满足盾构掘进的使用, 而且实现了废弃材料的循环使用, 具有较好地经济性和环保意义。

已有研究和工程对于现场泥浆的配制有一定的参考作用, 但是, 对于不同的地层和不同的制浆材料仍然需要进行合理的匹配。需要通过现场数据采集以及相关室内土工试验(主要为泥浆配比实验), 调整泥浆中水、膨润土、CMC、纯碱等的不同配合比, 得出膨润土、CMC、纯碱对泥浆粘度、重度、以及失水量的影响, 确定盾构在细砂地层中掘削过程中的最佳泥浆配料。

## 2. 泥浆配比试验

### 2.1. 泥浆材料选择

借鉴国内外越江泥水平衡盾构隧道工程实践, 采用新型盾构制浆剂 CMC、膨润土及纯碱作为泥浆制备的原材料, 如图 1 所示。

在地层条件差透水性高、地层中无粘粒补充的情况下(如砂土层), 使用膨润土制备泥浆, 可以增加泥浆中细颗粒的比例, 在黏土与黏土间、黏土与高聚物间交联吸附形成布满整个空间的网架结构, 更好的

保证泥水体系的稳定，提高泥水质量，保证开挖面稳定。

通过相互对照试验来研究泥浆材料对泥浆性能参数的影响，试验中采取的配比如表 1 所示。



**Figure 1.** The mud material used in the test  
**图 1.** 试验所用泥浆材料

**Table 1.** The ratio of slurry

**表 1.** 泥浆配比

编号	膨润土(g)	CMC(g)	纯碱(g)	水(mL)	备注
1	105	3.3	3.3	930	
2	125	3.3	3.3	930	
3	145	3.3	3.3	930	
4	165	3.3	3.3	930	
5	185	3.3	3.3	930	
6	105	2.7	3.3	930	
7	125	2.7	3.3	930	
8	145	2.7	3.3	930	
9	165	2.7	3.3	930	
10	185	2.7	3.3	930	
11	105	3.9	3.3	930	
12	125	3.9	3.3	930	
13	145	3.9	3.3	930	
14	165	3.9	3.3	930	
15	185	3.9	3.3	930	
16	105	3.3	3.0	930	
17	125	3.3	3.0	930	
18	145	3.3	3.0	930	
19	165	3.3	3.0	930	
20	185	3.3	3.0	930	
21	105	2.7	3.0	930	
22	125	2.7	3.0	930	

## Continued

23	145	2.7	3.0	930
24	165	2.7	3.0	930
25	185	2.7	3.0	930
26	105	3.9	3.0	930
27	125	3.9	3.0	930
28	145	3.9	3.0	930
29	165	3.9	3.0	930
30	185	3.9	3.0	930

由表 1 可知, 本试验内容考虑了掺入 5 种不同质量(105 g、125 g、145 g、165 g、185 g)的膨润土、3 种不同质量(3.3 g、2.7 g、3.9 g)的 CMC 及 2 种不同质量(3.3 g、3.0 g)的纯碱对于新制浆液性能的影响, 其中 1~15 组试验考虑在纯碱质量为 3.3g 的情况下, 研究掺入不同质量(105 g、125 g、145 g、165 g、185 g)膨润土、不同质量(3.3 g、2.7 g、3.9 g) CMC 的对浆液性能的影响; 16~30 组试验考虑在纯碱质量为 3.0 g 的情况下, 研究掺入不同质量(105 g、125 g、145 g、165 g、185 g)膨润土、不同质量(3.3 g、2.7 g、3.9 g) CMC 的对浆液性能的影响。

## 2.2. 试验结果及分析

试验结果如表 2 所示:

**Table 2.** Mud ratio test results

**表 2.** 泥浆配比试验结果

编号	比重/(g/cm <sup>3</sup> )	粘度(s)	失水量(cm/30min)	备注
1	1.081	22.32	12.03	/
2	1.120	24.56	13.11	/
3	1.141	29.34	13.20	/
4	1.184	31.75	13.00	/
5	1.236	42.63	12.55	/
6	1.074	19.22	12.09	/
7	1.113	20.15	12.54	/
8	1.135	26.87	12.55	/
9	1.166	29.76	12.53	/
10	1.228	40.33	13.18	/
11	1.088	24.52	12.06	/
12	1.126	26.88	11.79	/
13	1.150	31.10	11.38	/
14	1.191	35.62	12.25	/
15	1.248	45.21	12.00	/

Continued

16	1.082	22.52	14.03	/
17	1.118	24.88	15.11	/
18	1.141	29.79	15.20	/
19	1.182	32.01	15.00	/
20	1.235	42.71	14.55	/
21	1.074	20.22	14.09	/
22	1.113	23.35	14.54	/
23	1.135	29.56	14.55	/
24	1.166	33.67	14.53	/
25	1.228	42.43	15.18	/
26	1.088	25.52	14.06	/
27	1.126	27.88	13.79	/
28	1.150	32.56	13.38	/
29	1.191	37.28	14.25	/
30	1.248	46.43	14.00	/

对试验结果进行整理，可以绘制如下图线。

由图 2 可知，在考虑 CMC 和纯碱不变的情况下，泥浆的比重随膨润土的增加呈现增加的趋势。

由图 3 可知，在考虑 CMC 和纯碱不变的情况下，泥浆的粘度也随膨润土的增加呈现增加的趋势，当膨润土质量大于 165 g 时，泥浆粘度增长较快。

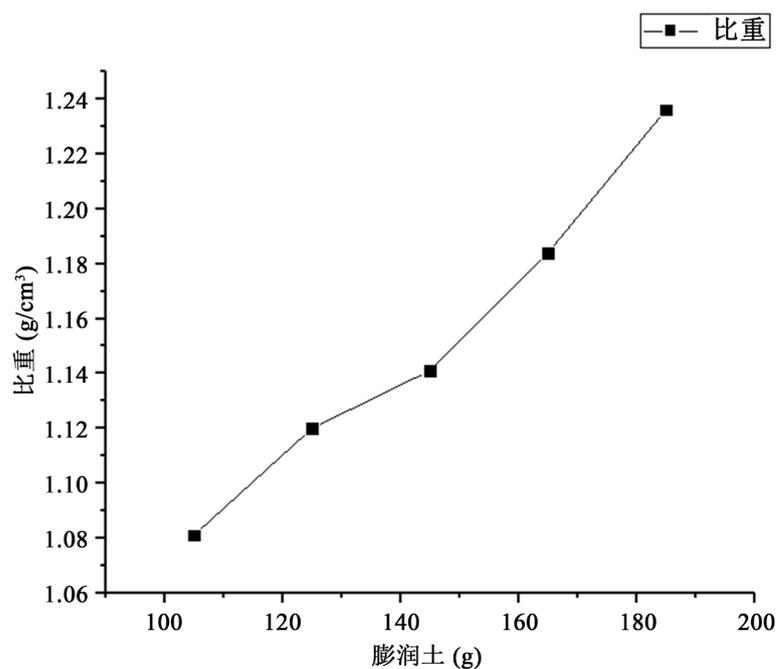


Figure 2. Law of specific gravity change

图 2. 比重变化规律

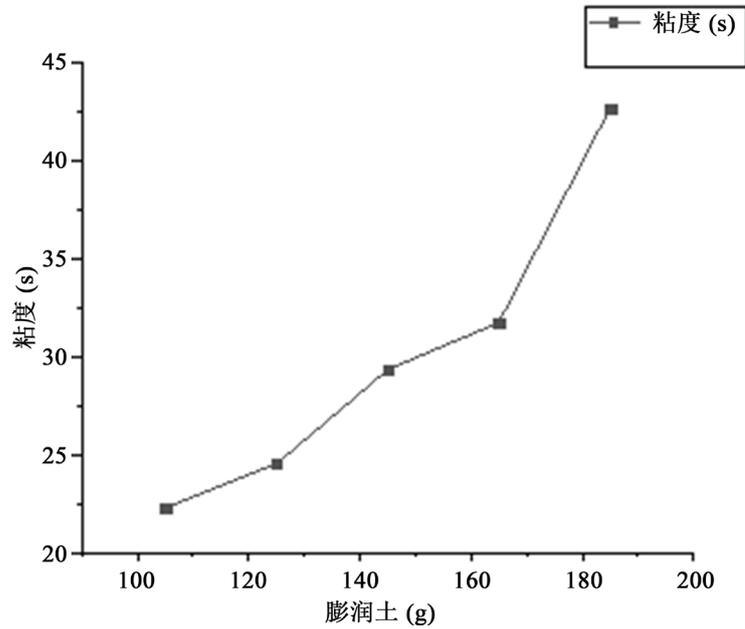


Figure 3. Law of viscosity change  
图 3. 粘度变化规律

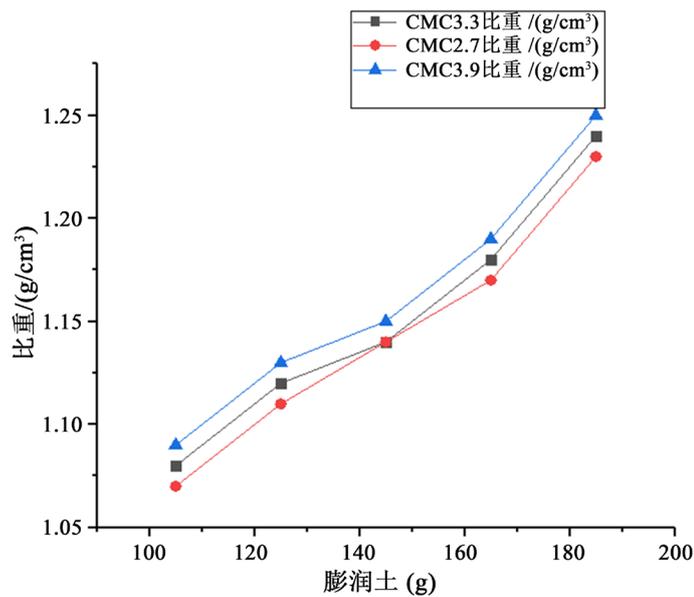


Figure 4. Comparison of specific gravity change rules  
图 4. 比重变化规律对比

由图 4 可知, 考虑纯碱不变的情况下, 泥浆比重随 CMC 增加或减少变化不大, CMC3.9 的泥浆比重较 CMC3.3、CMC2.7 略大; 在膨润土质量小于 145 g 时, CMC3.3 的水泥比重比 CMC2.7 的水泥比重大; 当膨润土质量大于 145 g 时, CMC2.7 的水泥比重又比 CMC3.3 的水泥比重大。

由图 5 可知, 考虑纯碱不变的情况下, 对粘度变化规律数据进行对比, 泥浆粘度随 CMC 增加呈现增加的趋势, 且 CMC3.9 的泥浆粘度最大, CMC2.7 的泥浆粘度最小。

通过失水量变化规律图 6 图 7 和图 8 可以看出, 在 CMC 不变的情况下, 纯碱质量 3.3 g 实验结果与

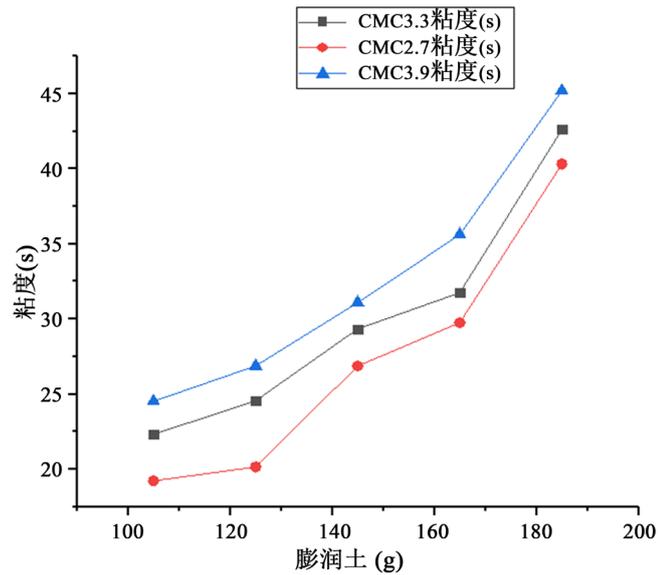


Figure 5. Viscosity change law comparison

图 5. 粘度变化规律对比

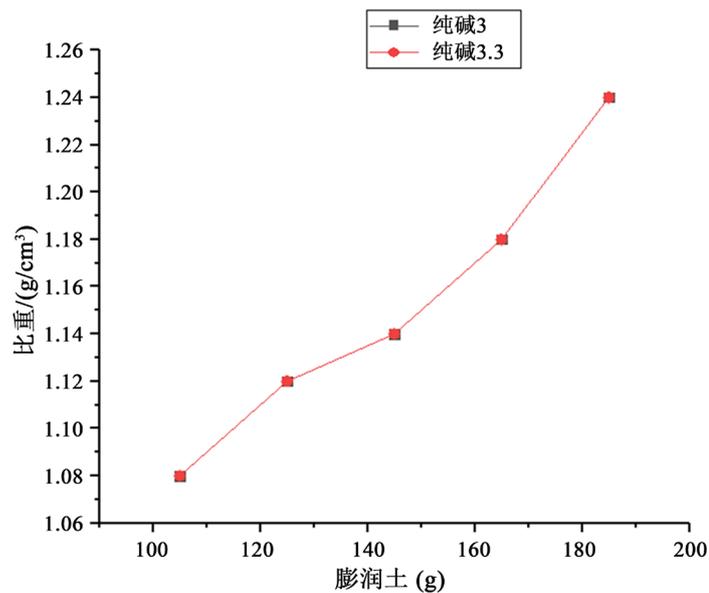


Figure 6. Law of specific gravity change

图 6. 比重变化规律

纯碱质量 3 g 实验结果的不同对比重和粘度几乎没有变化, 其比重和粘度都随膨润土的增加呈现增加的趋势, 但是失水量变化很大, 从而得出纯碱质量影响泥浆的失水量, 且在一定范围内, 泥浆中的纯碱质量越大, 其失水量也越大。

### 3. 泥浆成膜

由泥浆的作用机理可知, 开挖面稳定的重要条件是泥膜的形成, 而成膜的质量同泥浆与地层的匹配程度密切相关, 该匹配程度涉及泥浆的性能及配比, 例如增加制浆材料(膨润土)一定能在某个范围内起到对孔隙的填充作用, 从而影响泥浆的成膜质量, 同时, 成膜过程也受到外加因素的影响, 比如气泡舱压

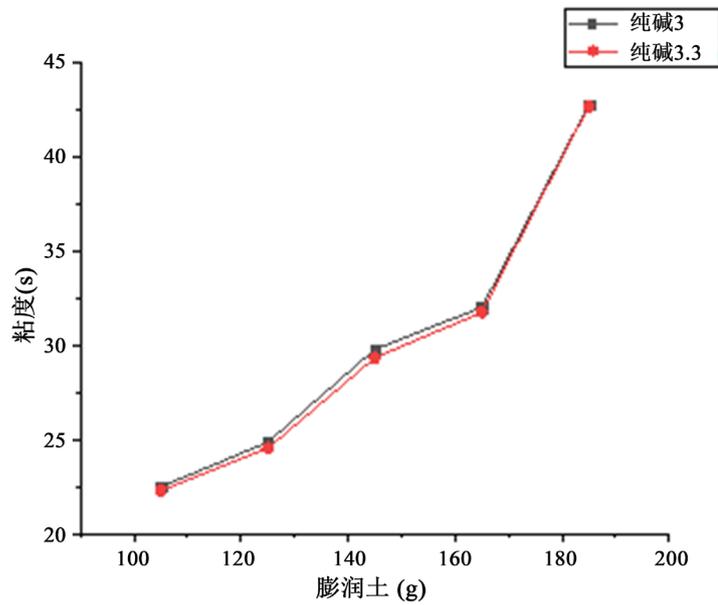


Figure 7. Law of viscosity change

图 7. 粘度变化规律

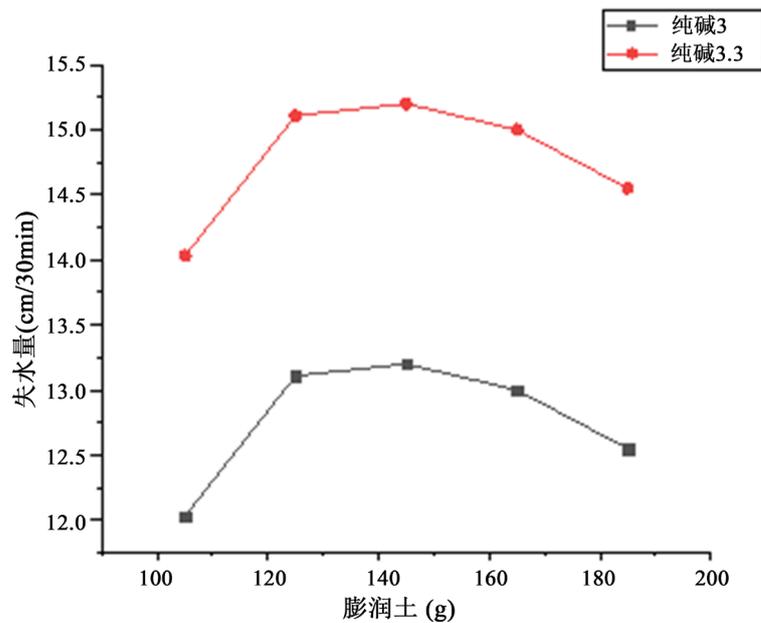


Figure 8. Change law of water loss

图 8. 失水量变化规律

力和前方土层特性等等。

结合现场施工的相关资料可知，为了增强地层的气密性，在开仓前通过土仓进行仓外土层的泥膜制作。

在开挖面形成泥膜对防止气体泄露和维持开挖面土体稳定是气压开仓的关键因素，泥膜是泥浆在开挖面形成的一种隔膜，可使泥浆与外界的土体隔离开来，在气压开仓作业前能在开挖面形成优质的泥膜，能有效的防止气体泄露、压力稳定，使土仓内气体与外界的水土压力通过泥膜维持平衡。施工采用梯级

泥浆压力和不同等级性能的泥浆进行泥膜制作，目的是增加泥浆的渗透量，使泥浆的颗粒尽量多、远的渗入土层，形成较厚的泥膜。泥膜质量的好坏可以通过气压泄漏量判定，气压泄漏量可以通过设备上的气体泄漏表读出，当泄漏量小于供气量的 10%，就可以判定泥膜制作效果较好，可以进仓作业。

还需进行保压试验，试验如下：在开仓前采用优质泥浆进行循环，达到较好的护壁效果。之后将气压仓液位降至 0 m 后，打开泥水仓和气压仓之间的联通阀，使气体窜至泥水仓，并调整气压设置值。最终达到两仓液位相平，上部为气体，下部为泥水。气压作业压力设定值采用停机过程中稳定开挖面的泥水压力。泥膜形成后、液位降低、作业压力设定后，静置 2 h，若供气量小于供气能力的 10% 时，同时观察、记录仓内液位及压力变化，若液位及压力无变化或变化小，则证明成膜质量好，泥水仓密封效果良好，地层气密性试验合格，可进行下一步作业；反之，则需重新成膜，直至达到良好的密封效果。

通过以上内容的研究总结出以下几点：

- 1) 泥浆成膜质量的主要影响因素为比重、粘度、压力与配比；
- 2) 成膜过程中的滤水量随压力差的增加而增大，对每一级气压，滤水量都逐渐增大并趋于稳定，且压力越高，达到稳定所需时间越短，即成膜所需时间越短；
- 3) 比重性能直接影响泥浆对地层孔隙的填充能力，泥浆的比重越大，成膜质量越好，成膜质量随比重的增加有逐步提高并趋于稳定的趋势。比重对达到成膜稳定所需时间的影响不大；
- 4) 粘度性能影响泥浆对土颗粒骨架的吸附能力，泥浆的粘度越大，成膜稳定所需时间越短。粘度对最终滤水量的影响不明显；
- 5) 同样的比重下，成膜质量也受到泥浆配比的影响，对粉细砂地层来说，新浆与原浆的混合浆液成膜效果较新浆更好；
- 6) 粉细砂地层中，浆液性能参数选取比重  $1.2 \text{ g/cm}^3$ ，粘度 25~30 s 时成膜质量较好。

结合工程实际，在泥水盾构施工前，配制一定浓度、粘度、足够量的泥浆供盾构循环使用，在盾构始发前，在泥浆槽里要制备施工所需的泥浆，第一次造浆量为  $900 \text{ m}^3$ 。泥浆比重  $1.15\sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ ，粘度 25~35 s，脱水量不大于 200 ml。在盾构穿越不同地层时，以上指标需做相应调整。最佳泥浆配(1  $\text{m}^3$ )配比如下表 3 所示。

**Table 3.** New pulp proportioning table

**表 3.** 新浆配比表

膨润土	CMC	纯碱	水
165 kg	3.3 kg	3.3 kg	930 kg

#### 4. 结论

- 1) 地层中的细颗粒材料由于容易沉淀，本身不会对比重和粘度有太大影响，但如果与已经加入膨润土与制浆剂的浆液混合，则会提高浆液的比重，该过程同样不会影响粘度；
- 2) 浆液的失水量同粘度关系密切，当浆液的粘度较大时，颗粒材料的聚合作用较强，流动性较差，对应的失水量也就越大，反之失水量越小；
- 3) 同样的比重下，成膜质量也受到泥浆配比的影响，对粉细砂地层来说，新浆与原浆的混合浆液成膜效果较新浆更好；
- 4) 在施工过程中泥浆比重设定为  $1.15\sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ ，粘度设定为 25~35 s，通过对施工现场泥浆参数的实测发现，各区间的出浆比重稳定，泥浆成膜质量良好，即进浆比重选择合适。

## 参考文献

- [1] 刘辉. 长距离富水砂层土压盾构引起的地表沉降研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [2] 张许平, 张学文. 防洪堤砂卵石地基工程地质特征及评价[J]. 山西水利科技, 2002(3): 70-71.
- [3] 向贤礼. 砂卵石地基的勘测方法与承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [4] Fritz, P. (2007) Additives for Slurry Shields in Highly Permeable Ground. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **40**, 81-95.
- [5] 韩晓瑞, 朱伟, 刘泉维, 等. 泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(s1): 288-292.
- [6] 王春河, 许满吉. 泥水盾构泥浆复合调制的应用分析[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 96-98.
- [7] 姚占虎, 姜腾. 南京纬三路过江通道粉细砂地层泥浆配制及成膜试验研究[C]//首届水下隧道建设与管理技术交流会论文集. 南京: 首届水下隧道建设与管理技术交流会, 2013.