

文章编号:2095-3046(2021)01-0007-06 DOI:10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2021.01.002
引文格式:刘邦,吴智,周涛,等:断层破碎带泥水盾构绿色泥浆试验研究[J].江西理工大学学报,2021,42(1):7-12.

断层破碎带泥水盾构绿色泥浆试验研究

刘邦¹, 吴智¹, 周涛¹, 陈云², 周中², 张称呈²

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司,长沙 410004;2. 中南大学土木工程学院,长沙 410075)

摘要:为解决大部分泥水盾构所用泥浆难以降解、污染性强、废浆量大、制浆成本高等问题,提出几种价格低廉、绿色环保的泥浆添加剂,并通过试验分析各添加剂对泥浆性能指标的影响,最终建议将麦芽糊精作为泥浆添加剂代替传统泥浆添加剂。根据断层破碎带的特点,提出一种绿色经济、适用性强的泥浆配比,即水:黏土:膨润土:无水碳酸钠:麦芽糊精=700:90~120:90~110:2~3:30~50。所提出的绿色泥浆添加剂以及配比可为类似工程现场施工提供借鉴和指导。

关键词:断层破碎带;泥水盾构;绿色泥浆;泥浆配比

中图分类号:U455 文献标志码:A

Experimental study on environment-friendly slurry for slurry shield in fault fracture zone

LIU Bang¹, WU Zhi¹, ZHOU Tao¹, CHEN Yun², ZHOU Zhong², ZHANG Chengcheng²

(1. SinoHydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China;

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

Abstract: Most of the mud used by the slurry shield is difficult to degrade, highly pollutant and generates large amount of waste slurry and high cost. In order to solve these problems, several low cost and environment-friendly mud additives were presented and the effects of these additives on the performance index of mud were analyzed through experiments. The study proposed to replace traditional mud additives with maltodextrin. Considering the characteristics of fault fracture zone, a green and economic ratio with wide applicability for composing mud is proposed, namely, water:clay:bentonite:anhydrous sodium carbonate:maltodextrin=700:90~120:90~110:2~3:30~50. The green mud additive and its ratio proposed can provide reference and guidance for similar projects.

Keywords: fault fracture zone; slurry shield; environment-friendly slurry; component ratio for mud

0 引言

泥水盾构工程中,以膨润土、水、黏土、增黏剂羧甲基纤维素(CMC)添加剂为主要成分的传统泥

浆因其良好的性能而被广泛应用于隧道施工。然而,实际工程应用中发现这种泥浆易对环境造成严重污染,泥浆性能参数难以控制,且施工过程中会产生大量的废浆^[1]。Heinz 发现在强渗透地层中一般的膨润土泥浆极易滤失从而引发开挖面失稳^[2]。

王中华认为目前多数泥浆所用的 CMC 抗温性能差,并且抗高价离子污染、抗盐能力有限,在更大范围内应用受到限制^[3]。针对传统泥浆存在的不足,韦良文等研究了聚合物和正电胶对泥浆的影响机理,并根据研究成果配制了一种新型泥浆,该新型泥浆具有很强的稳定性^[4-5];崔激等采用抗盐膨润土代替一般的钠基膨润土,配制了性能良好,能抵抗海水污染的新型泥浆^[6];张子新等配制了以天然黏土、碳酸钠、淀粉和淡水为成分的绿色泥浆,以及研究了预胶化淀粉作为添加剂其含量对泥浆性能的影响^[7-8];周中等研究了不同级配岩土复合材料的压实效果,以及断层破碎带泥水盾构施工泥浆配比问题,并分析了泥浆的适应性^[9-10]。

不同成分及配比的泥浆,性质千差万别。在泥浆渗透形成泥膜及泥浆相对地层适应性分析中,泥浆自身性质对二者的影响也不同,一些学者也在这方面做了大量的研究^[11-12]。王森以瓜尔胶和黄原胶取代传统泥浆添加剂进行绿色环保泥浆配制并通过配比试验确定了瓜尔胶和黄原胶的优选配比为 3:2^[13]。张凤祥等研究了泥浆的比重、黏度、pH 值、界面高度等对施工中在开挖面形成泥膜的质量影响,并确定了合理的取值^[14-15]。吴志均等分析了影响泥膜质量的主要因素,并且求解了泥浆渗透过程中的渗透速度、泥浆滤失量及泥膜孔隙率等渗透参数^[16-17]。

由以上研究可以看出,目前泥水盾构施工中所选用的泥浆大多数都是由水、黏土、膨润土、添加剂 CMC 和 Na₂CO₃ 所构成,此种泥浆难以降解,对环境污染性强,废浆量大,浆液指标难以控制。并且以往泥水盾构施工所需泥浆配比一般通过控制变量法,或是根据施工经验确定,这种确定泥浆配比的方法往往忽略了泥浆各成分间的叠加效应,容易造成制浆成本增加。因此研制一种新型的绿色泥浆十分必要。本文从环保的角度出发研究一种价格低廉、绿色环保的泥浆添加剂,并通过试验分析添加剂对泥浆性能指标的影响,确保满足施工要求,同时采用一种更加合理、全面的试验方法确定施工泥浆配比。研究结果可为类似工程现场施工提供借鉴和指导。

1 泥浆性能指标试验测定

1.1 泥浆试验材料及添加剂

1) 基浆材料

本试验采用的泥浆基浆成分包括水、黏土、膨润土等材料。试验所用黏土为施工现场所用的湖南地区的红黏土,现场采集后经烘干,筛分得到,粒

径≤0.075 mm。膨润土采用钠基膨润土。

2) 绿色添加剂

本文调研了几种绿色添加剂,并从性能、价格等方面进行综合对比分析,选取了无水碳酸钠、麦芽糊精、白糊精、卡拉胶、预胶化淀粉和 CMC 六种具有一定实用性、性能良好、绿色环保、价格低廉的绿色添加剂,各添加剂参数指标等见表 1。

表 1 各添加剂参数统计

外加剂类型	黏度指标 / (1% 水溶液, Pa·s)	价格 / (元·kg ⁻¹)
淀粉	—	8.0
无水碳酸钠	—	9.9
白糊精	—	17.5
麦芽糊精	水溶液小于 30% 时, 黏度小于 0.1 Pa·s, 而在浓度增加到 40% 时, 黏度增加到 0.78 Pa·s	6.0
卡拉胶	0.8~1.2	35.0
CMC	0.3~0.6	25.0

注:“—”指暂无可参考测量数据。

1.2 基浆配比

泥水盾构所选泥浆的基本配比材料包括黏土和膨润土。参考已有断层破碎带泥水盾构泥浆基本材料配比(水:黏土:膨润土=720:115:73),通过单因素分析法分析黏土、膨润土对泥浆性能的影响,确定基浆配比。

1) 膨润土含量对泥浆性能的影响

分析膨润土含量对泥浆性能的影响时,控制水和黏土的质量比为 700:100,其中黏土的粒径≤0.075 mm,然后依次分别向浆液中加入膨润土 15,30,45,60,75 g, 测定泥浆的三大指标及 pH 值。不同膨润土含量泥浆参数见表 2。

由表 2 可以看出,当泥浆中水和黏土的含量一定时,随着膨润土含量增加,泥浆黏度不断增加,泥浆比重也呈增加趋势,但影响较小。膨润土含量与泥浆滤失量呈反比关系,随着泥浆滤失量逐渐减少,对应形成的泥膜越来越致密,泥膜厚度越来越薄,可以推断其形成泥膜的时间也越来越短。膨润土含量增加使得泥浆 pH 值呈不断增加的趋势,且增加的速度较快。综合考虑不同膨润土含量对泥浆各参数的影响结果,为使得配制的泥浆容易形成泥膜且形成的泥膜致密良好,初步确定水:膨润土=700:80,膨润土含量向上取整,即 75 g 取 80 g。

表 2 不同膨润土含量泥浆参数统计

编号	水量 /g	黏土量 /g	膨润土量 /g	黏度 /(Pa·s)	比重 /(g·cm ⁻³)	滤失量 /mL	pH
PRT-1	700	100	15	15.64	1.082	138.18	7.5
PRT-2	700	100	30	15.35	1.071	92.36	7.6
PRT-3	700	100	45	15.87	1.085	79.66	8.0
PRT-4	700	100	60	16.65	1.090	66.08	8.3
PRT-5	700	100	75	17.36	1.150	53.54	8.4

2) 黏土含量对泥浆性能的影响

根据上述试验结果, 控制水:膨润土=700:80, 依次向浆液中加入黏土 25, 50, 75, 100, 125 g, 分别测定泥浆的参数, 不同黏土含量泥浆参数统计如表 3 所列。

由表 3 可以看出, 当泥浆中水和膨润土的含量一定时, 随着黏土含量增加, 泥浆黏度不断增加; 随着黏

土含量增加, 泥浆比重呈增加趋势, 且相关系数较小; 黏土含量与泥浆滤失量呈反比关系, 但影响较小; 膨润土含量增加使得泥浆 pH 值呈不断减小的趋势。综合考虑黏土含量对泥浆性能指标的影响, 初步确定黏土含量为 125 g 向上取整即 130 g。最终得到的泥浆基浆质量配比为水:黏土:膨润土=700:130:80。

表 3 不同黏土含量泥浆参数统计表

编号	水量 /g	黏土量 /g	膨润土量 /g	黏度 /(Pa·s)	比重 /(g·cm ⁻³)	滤失量 /mL	pH
NH-1	700	25	80	17.00	1.059	41.38	9.3
NH-2	700	50	80	17.65	1.080	41.30	9.0
NH-3	700	75	80	17.69	1.099	41.12	8.7
NH-4	700	100	80	17.91	1.122	40.86	8.5
NH-5	700	125	80	18.10	1.130	40.70	8.2

1.3 各添加剂对泥浆性能影响对比分析

将 6 种添加剂对泥浆性能的影响进行统一对比分析, 无水碳酸钠和 CMC 作为添加剂在泥浆中的用量相对其他几种绿色添加剂很少, 因此为研究方便定义无水碳酸钠和 CMC 为 A 类添加剂, 定义麦芽糊精、白糊精、卡拉胶和预胶化淀粉为 B 类添加剂。各添加剂对泥浆性能的影响见图 1。

由图 1 可以看出:

1) CMC 对泥浆黏度的影响最大, 较小的 CMC 用量就会造成泥浆黏度大幅增加, 当 CMC 在泥浆中含量达到 0.27% 时, 泥浆黏度超过了 70 Pa·s。因此, 泥浆配比中 CMC 用量不宜过多, 否则不利于泥浆输送。无水碳酸钠对泥浆黏度具有一定的影响, 当无水碳酸钠含量增加 0.22%, 泥浆黏度增大了 14.73%, 泥浆中无水碳酸钠的作用主要是为泥浆提供碱性环境。卡拉胶作为一种胶体具有很强的黏

性, 用量越多泥浆的黏度越大, 试验结果表明, 200% 的卡拉胶使得泥浆的黏度增加了 70.51%, 作用效果尤为明显。麦芽糊精对泥浆黏度的影响次之, 随麦芽糊精含量增加泥浆黏度不断提高, 若经过合理配比, 由图 1 可知麦芽糊精泥浆漏斗黏度可以达到 30~35 Pa·s。白糊精对泥浆黏度的影响仅次于麦芽糊精, 同等条件下白糊精泥浆黏度小于麦芽糊精泥浆黏度。预胶化淀粉对泥浆黏度有显著的提升作用, 200% 的预胶化淀粉可使泥浆黏度增加 107.60%。

2) 无水碳酸钠和 CMC 对泥浆比重的影响很小。随卡拉胶含量增加, 泥浆比重处于波动状态, 且波动幅度很小。麦芽糊精对泥浆黏度的影响是先增大后不断减小, 当泥浆中麦芽糊精的含量达到 12.5% 时, 泥浆比重为 1.141 g/cm³。白糊精对泥浆黏度的影响是先减小后波动变化, 当泥浆中白糊精的含量达到 12.5% 时, 其比重和麦芽糊精泥浆比重相同。预胶化淀粉对泥浆比重的影响较大, 增加 2 倍

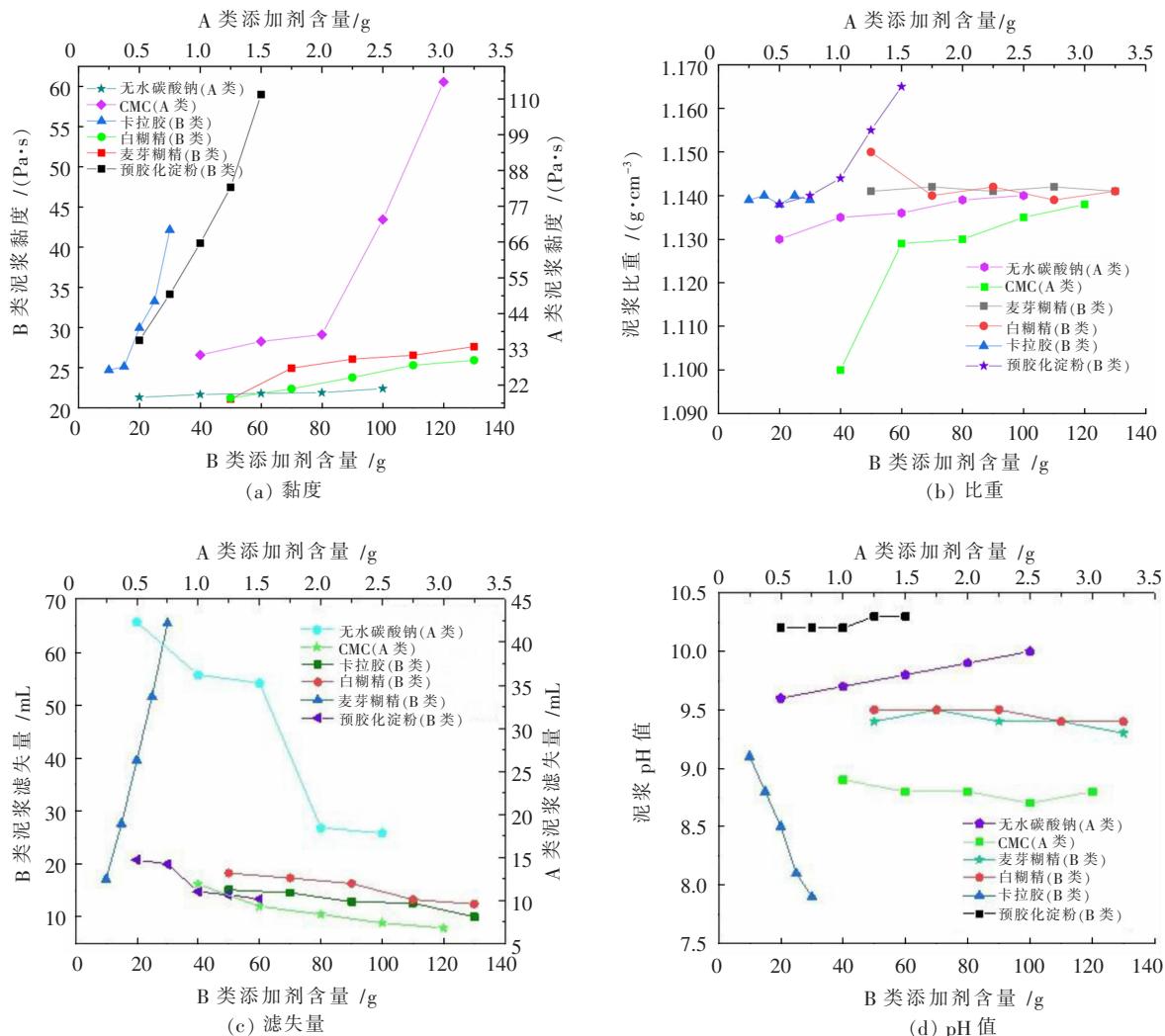


图 1 各添加剂对泥浆性能影响对比

的预胶化淀粉后,泥浆比重较初始时候变化很大。

3) 当泥浆中 CMC 含量增加 200%, 泥浆滤失量可减小 42.86%, 泥浆中 CMC 含量为 0.22% 时, 滤失量为 8.40 mL。0.22% 的无水碳酸钠使得泥浆滤失量减小 57.86%, 无水碳酸钠对泥浆滤失量的影响效果尤为明显。泥浆滤失量随卡拉胶含量的增加而增加。其余添加剂含量增加使得泥浆滤失量均呈减小趋势, 其中当泥浆中麦芽糊精含量增加 160%, 泥浆滤失量降低了 33.77%, 当泥浆中麦芽糊精的含量达到 12.5% 时, 泥浆滤失量为 10.04 mL。当白糊精含量增加 160%, 泥浆滤失量降低了 31.91%, 影响效果小于麦芽糊精。当预胶化淀粉含量增加 200%, 泥浆滤失量降低了 35.58%。

4) CMC 对泥浆 pH 值几乎不产生影响, 0.33% CMC 泥浆 pH 值处于 9~10 的区间。微量的无水碳酸钠可改变泥浆的 pH 值, 当泥浆中无水碳酸钠含量为 0.27% 时, 泥浆 pH 值达到 10。随卡拉胶含量增加, 泥浆 pH 值快速下降, 3.19% 卡拉胶泥浆 pH

值为 7.9。麦芽糊精和白糊精对泥浆 pH 值影响很小, 12.5% 的麦芽糊精泥浆和白糊精泥浆 pH 值均处于 9~10 的区间。预胶化淀粉对泥浆 pH 值几乎没有影响。

2 断层破碎带绿色泥浆配比确定

根据分析结果, 综合考虑各添加剂对泥浆性能的影响, 添加剂选用顺序初步确定为: CMC>预胶化淀粉>无水碳酸钠>麦芽糊精>白糊精>卡拉胶。CMC 作为泥浆添加剂配制的泥浆易对环境造成严重污染, 泥浆性能参数难以控制, 且施工过程中会产生大量的废浆。预胶化淀粉泥浆在高温下极易失效, 发酵性强, 耐温性差。泥浆中加入无水碳酸钠过多, 易变成强碱性泥浆, 会对周围的结构物造成腐蚀。卡拉胶在冷水中不溶解, 其具有的胶黏性使得泥浆中的微小土颗粒吸附在一起, 形成絮状结构, 不易溶解于水, 无法形成泥浆溶液。麦芽糊精泥浆

性能指标很符合施工参数取值,且麦芽糊精发酵性很小,耐高温,稳定性好。白糊精同麦芽糊精的作用效果相似,但其作为泥浆添加剂得到的泥浆参数不如麦芽糊精。

因此,最终建议将麦芽糊精作为泥浆添加剂以代替传统泥浆添加剂,并且由图 1 可以看出,无水碳酸钠加入量分别为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 g。随着碳酸钠含量的增加溶液碱性增强,增加了水化膜厚度,提高了泥浆的交替性和稳定性,从而降低了泥浆滤失量,碳酸钠对泥浆滤失量的影响效果十分显著。随着泥浆滤失量逐渐减少,对应形成的泥膜越来越致密,泥膜厚度越来越薄,泥膜质量也逐渐变好。故考虑无水碳酸钠含量对泥浆性能指标的影响,初步确定无水碳酸钠含量为 2.5 g。麦芽糊精含量分别为 50,70,90,110,130 g,泥浆黏度随麦芽糊精含量的增加而增加,初期作用效果较为显著,麦芽糊精含量增加 40%,泥浆黏度增加 18.20%。随后泥浆黏度增长速率相比初期有所减少。另考虑对于断层破碎带,泥水盾构施工泥浆漏斗黏度一般建议

取值为 20~25 Pa·s,故初步确定麦芽糊精含量为 70 g。因此泥浆配比初步确定为水:黏土:膨润土:无水碳酸钠:麦芽糊精=700:130:80:2.5:70。同时基于正交试验原理对断层破碎带绿色泥浆配比做进一步研究,以期确定合理、经济、方便施工的泥浆配比。

本节以水量 700 g 为基础,以黏土、膨润土、无水碳酸钠和麦芽糊精含量为 4 个变量因素,各选择 5 个水平,以泥浆黏度、比重、滤失量和 pH 值为考察指标,利用 SPSS 25 进行 L₂₅(5⁴)正交试验设计分析,见表 4。

对于断层破碎带,泥水盾构施工泥浆漏斗黏度一般建议取值为 20~25 Pa·s,泥浆比重建议取值 1.100~1.130,泥浆滤失量建议取值为不超过 25 mL,泥浆 pH 值建议取 8~10 左右。由表 5 可以看出,编号为 ZJ-9 和 ZJ-15 的泥浆参数符合所述的施工建议值。考虑到实际施工中所需配制的泥浆应尽量满足经济、性能良好的特点,以两种泥浆中各组分含量为上下限,建议确定断层破碎带泥浆中各组分含量配比为水:黏土:膨润土:无水碳酸钠:麦芽糊精=700:90~120:90~110:2~3:30~50。

表 4 正交试验变量取值

序号	黏土含量 /g	膨润土含量 /g	无水碳酸钠含量 /g	麦芽糊精含量 /g
1	60	30	1.5	30
2	90	50	2.0	50
3	120	70	2.5	70
4	150	90	3.0	90
5	180	110	3.5	110

表 5 基于正交试验原理泥浆配比及指标测定

泥浆编号	黏土量 /g	膨润土量 /g	无水碳酸钠量 /g	麦芽糊精量 /g	黏度 /(Pa·s)	比重 /(g·cm ⁻³)	滤失量 /mL	pH 值
ZJ-1	60	30	1.5	30	17.04	1.093	43.20	10.3
ZJ-2	60	50	2.0	50	18.46	1.085	27.20	10.2
ZJ-3	60	70	2.5	70	21.17	1.099	20.20	10.2
ZJ-4	60	90	3.0	90	24.67	1.100	16.20	10.1
ZJ-5	60	110	3.5	110	30.60	1.105	14.00	10.2
ZJ-6	90	30	2.0	70	18.64	1.090	39.80	10.2
ZJ-7	90	50	2.5	90	20.70	1.090	29.40	10.2
ZJ-8	90	70	3.5	110	22.84	1.112	19.60	10.2
ZJ-9	90	90	3.0	30	23.52	1.108	20.40	10.2
ZJ-10	90	110	1.5	50	18.98	1.130	14.20	10.0

续表5 基于正交试验原理泥浆配比及指标测定

泥浆编号	黏土量/g	膨润土量/g	无水碳酸钠量/g	麦芽糊精量/g	黏度/(Pa·s)	比重/(g·cm ⁻³)	滤失量/mL	pH值
ZJ-11	120	30	2.5	110	19.79	1.119	52.40	10.3
ZJ-12	120	50	3.0	30	18.99	1.120	41.40	10.4
ZJ-13	120	70	3.5	50	21.12	1.129	26.80	10.3
ZJ-14	120	90	1.5	70	24.62	1.150	18.20	10.0
ZJ-15	120	110	2.0	50	25.42	1.112	13.20	9.9
ZJ-16	150	30	3.0	110	18.24	1.134	16.80	10.4
ZJ-17	150	50	3.5	70	21.56	1.129	34.00	10.4
ZJ-18	150	70	1.5	90	22.48	1.125	28.60	9.9
ZJ-19	150	90	2.0	110	26.87	1.150	20.60	9.9
ZJ-20	150	110	2.5	30	31.99	1.156	21.00	10.1
ZJ-21	180	30	3.5	90	19.85	1.131	72.60	10.4
ZJ-22	180	50	1.5	110	22.18	1.132	40.60	10.4
ZJ-23	180	70	2.0	30	21.46	1.157	33.60	10.1
ZJ-24	180	90	2.5	50	25.29	1.178	22.60	10.1
ZJ-25	180	110	3.0	70	36.80	1.182	18.40	10.1

3 结 论

本文针对泥水盾构在断层破碎带这一强渗透地层施工时的绿色泥浆配比问题,进行了大量的试验研究,得到的主要结论有:

1) 确定了绿色泥浆的基浆配比,分析了6种添加剂对泥浆性能的影响。

2) 结合试验结果中各添加剂对泥浆性能的影响,对比分析了各添加剂的优缺点,建议将麦芽糊精作为泥浆添加剂以代替传统泥浆添加剂。

3) 通过正交试验研究了各配比下的泥浆性能参数,提出了适用于断层破碎带泥水盾构绿色泥浆配比为水:黏土:膨润土:无水碳酸钠:麦芽糊精=700:90~120:90~110:2~3:30~50。

参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] HEINZ A. Modifizierte Bentonitsuspensionen für geotechnische Bauverfahren in Böden hoher Durchlässigkeit [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2007.
- [3] 王中华. 国内近期钻井液降滤失剂研究与应用进展[J]. 石油与天然气化工, 1994, 23(2):108~111.
- [4] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义, 等. 用于泥水盾构隧道的聚合物正电胶泥浆研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(1):66~70.
- [5] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义. 泥水盾构隧道 PMS 泥水体系的研发与应用[J]. 建井技术, 2006, 27(1):38~42.
- [6] 崔微, 黄小龙, 李永杰. 陆丰核电海底排水隧道泥水盾构泥浆配比试验研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6):125~128.
- [7] 张子新, 胡欣雨, 黄昕. 一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11):1574~1578.
- [8] 王廷. 强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] 周中, 张磊, 缪林武, 等. 断层破碎地层泥水盾构泥浆渗透试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3):682~689.
- [10] 周中, 刘撞撞, 杨豪. 不同含石量下土石混合体重型击实试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2019, 40(5):8~14.
- [11] 叶伟涛, 王靖禹, 付龙龙, 等. 福州中粗砂地层泥水盾构泥浆成膜特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5):1260~1269.
- [12] 柳毅强. 盾构在富水砂砾(卵)石地层掘进时应用的泥浆配比优化试验研究[J]. 建筑施工, 2017, 39(6):857~859.
- [13] 王森. 泥水盾构绿色泥浆配制及其对开挖面土体性质影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [14] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [15] 吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1):3460~3467.
- [16] 吴志均, 杨宪民, 唐红君. 泥饼质量评价方法探讨[J]. 钻井液与完井液, 1997(6):8~10.
- [17] 曹成勇. 浅埋透水复合地层泥水盾构开挖面稳定性及掘进参数研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.