

沙漠地区大直径顶管施工护壁减阻浆液研究与应用

张 闯^{1,2}, 隆 威^{1,2}, 李建中^{1,2}, 卢一飞³

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 广东深圳 518000)

摘要: 沙漠地区地层稳定性差, 摩阻力大, 导致长距离大直径顶管施工时间长, 浆液输送压力损失大, 极易造成地层垮塌埋管, 顶管阻力急剧增加导致顶进失败。沙漠地区大直径顶管工程顺利顶进的关键是浆液应具有较好的润滑减阻和成套护壁作用。基于这一关键问题, 开展室内试验和现场应用研究, 研发出了适合沙漠地区顶管的新型护壁减阻浆液, 采用高岭土聚合物浆液作为机头同步注浆浆液, 无粘土高聚物浆液作为沿线跟进补浆浆液。同步注浆浆液在润滑减阻的基础上主要突出成套护壁作用, 而跟进补浆浆液主要突出润滑减阻特性, 从而使润滑减阻浆液系统达到最佳的润滑和护壁作用。研发的新型护壁减阻浆液应用于内蒙古乌兰布和沙漠穿沙输水项目 7~9 号顶段——国内外首例沙漠地区大直径顶管工程, 效果良好, 顶进工作顺利地完成。该研究提升了沙漠地区顶管工程关键技术、解决了护壁与减阻问题, 具有极大的社会价值和经济效益。

关键词: 长距离大直径顶管; 护壁; 减阻; 浆液; 沙漠地层

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)10-0177-08

Research and Application of Wall-reducing Slurry for Large Diameter Pipe Jacking in Desert Area/ZHANG Chuang^{1,2}, LONG Wei^{1,2}, LI Jian-zhong^{1,2}, LU Yi-fei³ (1. Key Laboratory of Metalorganic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China)

Abstract: In the desert area, the stratum stability is poor and the frictional resistance is large, resulting in long distance and large diameter pipe jacking construction for a long time. The pressure loss of slurry transportation is large. It is easy to cause formation collapse and burying. The key to the smooth jacking of the large diameter pipe jacking project in the desert area is that the slurry should have good lubrication resistance and complete wall protection. Based on this key issue, indoor trials and field application studies were carried out to develop a new type of wall-reducing slurry suitable for pipe jacking in desert areas. Kaolin polymer slurry was used as the synchronous grouting slurry for the nose and the clay-free polymer slurry was used as a follow-up slurry along the line. On the basis of lubrication resistance reduction, the synchronous grouting slurry mainly focuses on the complete wall protection function, while the follow-up grouting slurry mainly highlights the characteristics of lubrication and drag reduction, so that the lubrication and drag reducing slurry system can achieve the best lubrication and wall protection functions. The new type of wall-reducing slurry for resistance reduction was developed for the first large-diameter pipe jacking project in the desert area at the top of 7~9 in the Ulan Buh desert sand-carrying water project in Inner Mongolia. The effect was good and the jacking-in work was successfully completed. The study has improved the key technologies of the pipe jacking engineering in desert areas, solved the problem of wall protection and drag reduction, and has great social and economic benefits.

Key words: long distance large diameter pipe jacking; wall protection; drag reduction; slurry; desert stratum

目前我国石油天然气能源、水资源需求急剧增长, 石油、天然气、水资源输送管道工程项目日益增多, 如西气东输、川气东送、南水北调等, 许多管道不可避免穿越沙漠地区^[1]。作为非开挖技术^[2-6]的主

要方法之一的顶管法^[7-11]应用越来越普遍。在顶管施工中, 为减小顶进时管外壁所受的摩擦阻力需进行注浆减阻。泥浆材料多采用合成材料和高效处理剂, 有利于提高泥浆的护壁减阻性能^[12]。Khaza-

收稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“非饱和网纹红土的蠕变与加载速率效应研究”(编号: 41572269); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“非饱和网纹红土蠕变特性研究”(编号: 2018zzts202)

作者简介: 张闯, 女, 汉族, 1990 年生, 博士研究生在读, 地质资源与地质工程专业, 从事大直径顶管施工方面的研究工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学校本部, 980191776@qq.com。

ei^[13]通过FLAC^{3D}进行了注浆减阻模拟,研究其减阻效果,将实测数据进行对比验证。Shimada^[14]通过建立2D有限元模型,分析了浆液在隧道中的填充及减摩作用。Kastner与Pellet^[15]通过分析整理法国微型隧道工程现场记录的各种数据,对顶管顶进中侧摩阻力所受的影响进行了研究。K. Shou, J. Yen, M. Liu^[16]研究了润滑油对泥浆的影响。James C. Ni, Louis Ge, Wen-Chieh Cheng^[17]通过分析影响顶管顶力的因素主要来自表面压力的穿透阻力和管道与周围土壤的摩擦阻力,研究了粗细泥浆对顶管顶进中减小阻力的作用。Saeid Khazaei, Hideki Shimada, Kikuo Matsui^[18]进行了泥浆对顶管推力影响的分析与预测。喻军、李元海^[19]等研究了泥浆套的物理性质及减阻效果。魏刚、徐日庆^[20]等研究了顶管施工中注浆减阻作用机理。但是鲜有人研究应用于沙漠地区大直径顶管施工注浆护壁减阻材料。

沙漠地区地层稳定性差,砂土呈松散、流动态,无粘性,摩阻力大。长距离大直径顶管施工时间长、难度大,护壁与减阻浆液性能要求高,浆液长距离输送压力损失大,作用效果不理想,顶管施工时极易造成地层垮塌埋管,顶管阻力急剧增加导致顶进失败^[21]。根据诸多顶管工程施工案例和技术资料^[22-25]可知,沙漠地区大直径顶管顺利顶进的关键是浆液应具有较好的润滑减阻和成套护壁作用。本文正是基于这一关键问题,开展室内试验和现场应用研究,研发出了适合沙漠地区顶管的新型护壁减阻浆液,采用高岭土聚合物浆液作为机头同步注浆浆液,无粘土高聚物浆液作为沿线跟进补浆浆液,注浆系统也将由同步注浆系统和跟进补浆系统组成,形成同步和跟进两套注浆工艺。同步注浆浆液在润滑减阻的基础上主要突出成套护壁作用,而跟进补浆浆液主要突出润滑减阻特性,从而使润滑减阻浆液系统达到最佳的润滑和护壁作用。研发的新型护壁减阻浆液应用于内蒙古乌兰布和沙漠穿沙输水项目7~9号顶段,是国内外首例沙漠地区大直径顶管工程。该研究提升了沙漠地区顶管工程关键技术、解决了护壁与减阻问题,而且将极大地推动顶管工程的快速发展,进而提升城市基建在地下空间的发展速度和石油天然气能源、水资源的开发利用效率,具有极大的社会价值和经济效益。

1 护壁减阻浆液作用机理

顶管工程中,顶管机在地层中进行掘进作业,其掘进过程中会引起管壁周围土体扰动,导致四周土体松散。严重的会产生顶进路线上方出现路面塌陷的情况,造成安全隐患。且顶管工程中管壁与周边土体间摩阻力过大也会引起施工过程中效率降低,工期变长。注浆工艺在顶管工程中是必不可少的一环。在管道顶进中注入护壁堵漏浆液,浆液能在管壁与开挖面土层之间形成密闭良好的泥浆套,一方面起到护壁堵漏作用,浆液渗入到管壁四周土层后胶结,使顶进面稳定性增加,降低周边土体的变形量,减轻土体因扰动导致地面塌陷的可能性,达到改善周边土层稳定性的效果。另一方面则是达到润滑减阻的作用,通过机头同步注浆所注入的护壁堵漏浆液有效地改善不良地层浆液漏失严重的情况,使得后续的跟进补浆润滑减阻浆液有效地作用于管壁与泥浆套之间,保证管壁与土体间的空隙能够充满浆液。由于浆液的存在使得原本管道顶进过程中管壁与土体之间直接存在的干摩擦转变为管壁与润滑浆液之间的湿摩擦,显著减小了管道顶进中的摩擦阻力。

2 浆液室内试验

2.1 实验材料

材料:高岭土、NaOH、羧甲基纤维素 CMC、聚丙烯酰胺(PAM 2000 万分子量)。

仪器:漏斗粘度计、ZNN-D6型旋转粘度计、ZNS型泥浆失水量测定仪。

2.2 浆液配比实验

2.2.1 机头同步注浆浆液:高岭土聚合物浆液

由高岭土、NaOH、羧甲基纤维素(CMC)按一定配比配制,对数据进行对比分析,根据施工现场要求,得出同步注浆膏状浆液配方。

不同NaOH加量对浆液的性能影响见表1。

由图1、图2可知,浆液漏斗粘度及动切力随着NaOH加量的增加而呈上升趋势,加量越大上升的速率越快即上升幅度越大。根据图表分析,数值在NaOH加量为0.2%以后陡然增加,上升的幅度特别大,故NaOH加量取0.2%。

不同高岭土及不同CMC加量对浆液的性能影响见表2。

通过表2中数据对比发现,17.5%高岭土和

表 1 不同 NaOH 加量的浆液性能测试

试验编号	基浆配方		漏斗粘度/ s	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ mPa	表观粘度/ (mPa·s)	流性 指数	稠度 指数
	高岭土/%	NaOH/%						
1	12.0	0.1	17.04	4.5	12.5	5.75	0.716	0.040
1(24 h)	12.0	0.1	17.68	5.2	19.0	7.10	0.658	0.074
2	12.0	0.2	18.36	5.5	27.5	8.25	0.585	0.143
2(24 h)	12.0	0.2	21.16	7.0	40.0	11.00	0.553	0.239
3	12.0	0.3	26.63	4.0	150.0	19.00	0.160	6.249
3(24 h)	12.0	0.3	104.85	6.0	240.0	30.00	0.152	10.463
4	12.0	0.5	>300	1.0	500.0	51.00	0.014	46.216
4(24 h)	12.0	0.5		3.5	545.0	58.00	0.044	42.698

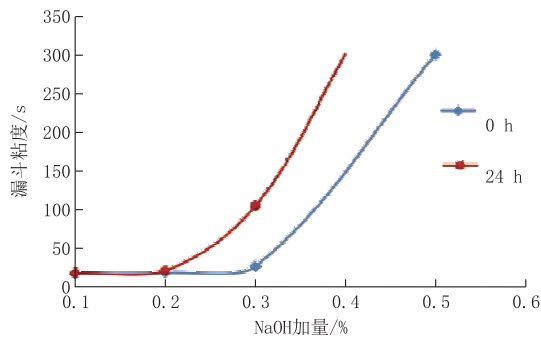


图 1 漏斗粘度变化曲线

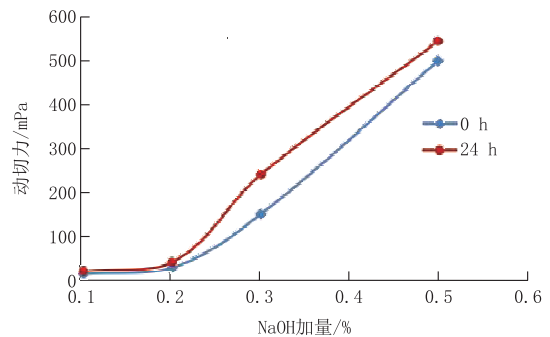


图 2 动切力变化曲线

表 2 不同高岭土及不同 CMC 加量的浆液性能测试

试验编号	基浆配方		漏斗粘度/ s	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ mPa	表观粘度/ (mPa·s)	流性 指数	稠度 指数
	高岭土/%	NaOH/%						
1(+0.05%CMC)	12.0	0.2	20.06	6.3	38.5	10.15	0.536	0.247
1(24 h)	12.0	0.2	23.56	8.8	41.0	12.90	0.602	0.199
2(+0.05%CMC)	15.0	0.2	40.53	10.5	72.5	17.75	0.506	0.533
2(24 h)	15.0	0.2	64.18	13.0	92.5	22.25	0.498	0.703
3(+0.05%CMC)	17.5	0.2	207.43	15.5	217.5	37.25	0.337	3.617
3(24 h)	17.5	0.2	>300	17.0	272.5	44.25	0.308	5.245
4(+0.04%CMC)	17.5	0.2	107.41	16.0	180.0	34.00	0.387	2.327
4(24 h)	17.5	0.2	>300	17.0	240.0	41.00	0.335	4.018
5(+0.03%CMC)	17.5	0.2	84.56	13.5	185.0	32.00	0.342	2.996
5(24 h)	17.5	0.2	258.00	18.5	220.0	40.50	0.374	3.032
6(+0.025%CMC)	17.5	0.2	68.16	13.0	165.0	29.50	0.359	2.450
6(24 h)	17.5	0.2	109.35	18.0	200.0	38.00	0.390	2.548
7(+0.015%CMC)	20.0	0.2	170.00	15.5	220.0	37.50	0.334	3.706
7(24 h)	20.0	0.2	>300	19.5	325.0	52.00	0.300	6.523
8(+0.01%CMC)	20.0	0.2	115.50	18.0	187.5	36.75	0.405	2.220
8(24 h)	20.0	0.2	164.82	18.5	227.5	41.25	0.366	3.258

20%高岭土加量时浆液的性能较好,而 17.5%高岭土+0.04%CMC 与 20%高岭土+0.01%CMC 流变性能相近,区别在于所配的浆液中高岭土含量的多少以及失水量的大小。由图 3、图 4 可知,高浓度高岭土浆液的漏斗粘度、动切力随 CMC 加量增加而变大,从 17.5%高岭土曲线可以看出,漏斗粘度随 CMC 加量的增加上升趋势明显,24 h 预水化后 0.04%CMC 加量的浆液漏斗粘度已经超过了 300

s。CMC 具有明显的增粘效果。

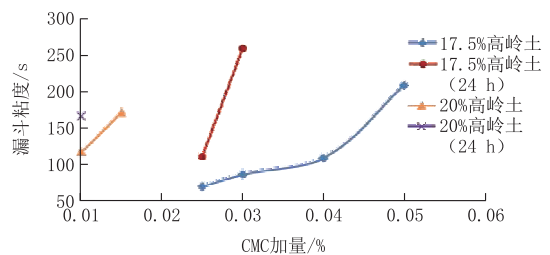


图 3 漏斗粘度变化曲线

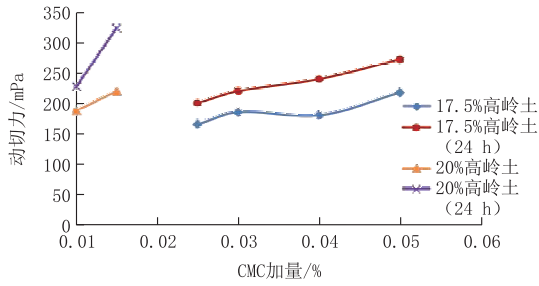


图4 动切力变化曲线

由图5和图6可知,浆液流性指数随高岭土、CMC加量增加而下降,稠度指数则随之上升。护壁浆液在堵漏性能上的要求较高,浆液拥有一定的稠度利于形成致密的泥浆套,但考虑到浆液从地表注入至地层中的输送过程,对浆液的流性指数也有一定的要求。若是浆液过稠,护壁浆液容易在输送至远端时浆液流动缓慢,泵入困难,导致泵压增大。

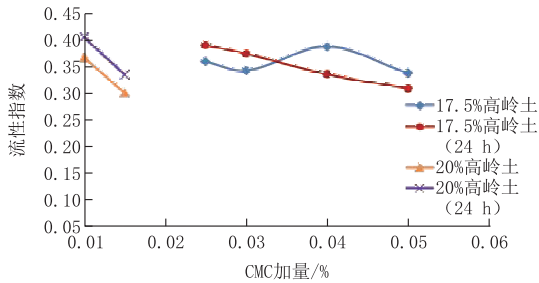


图5 流性指数变化曲线

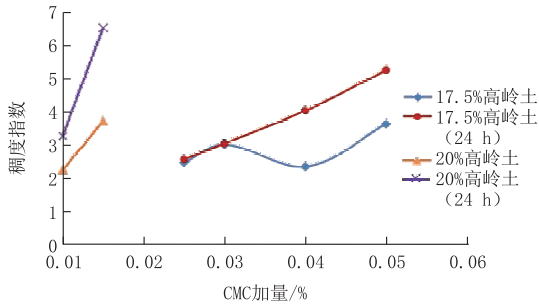


图6 稠度指数变化曲线

不同高岭土及不同 CMC 加量对浆液失水量和浆液状态的影响见表 3。

由表 3 可知,失水量随着 CMC 加量增加而减小,因此在高浓度高岭土浆液中 CMC 具有良好的降失水作用。在进行浆液配比试验过程中对高岭土加量和 CMC 加量进行调节以达到让浆液在静止后趋向于冻胶状态,使浆液粘度不会过高而影响浆液的可泵性。泥皮厚度随高岭土加量增加而增加,CMC 加量对泥皮厚无影响。

表3 不同高岭土及不同 CMC 加量的浆液失水性测试

试验编号	基浆配方		失水量/mL	泥皮厚度/mm	浆液状态
	高岭土/%	NaOH/%			
1(+0.05%CMC)	12.0	0.2	17.6	1.0	
2(+0.05%CMC)	15.0	0.2	12.0	1.7	
3(+0.05%CMC)	17.5	0.2	5.5	2.6	冻胶状
4(+0.04%CMC)	17.5	0.2	8.0	2.6	冻胶状
5(+0.03%CMC)	17.5	0.2	9.2	2.6	冻胶状
6(+0.025%CMC)	17.5	0.2	9.3	2.6	冻胶状
7(+0.015%CMC)	20.0	0.2	9.2	3.4	
8(+0.01%CMC)	20.0	0.2	8.5	3.4	

通过以上试验得出最优机头同步注浆浆液配方:17.5%高岭土+0.025%CMC+0.2%NaOH+100%水。

此配方浆液性能参数:漏斗粘度 68.16 s、塑性粘度 13 mPa·s、动切力 165 mPa、表观粘度 29.5 mPa·s、流性指数 0.359、稠度指数 2.45、失水量 9.3 mL、浆液状态为冻胶状。

配制方法:加水 60%~80%搅拌下加入高岭土及 NaOH 搅拌 20 min,加入余量水继续搅拌 10 min,慢慢撒粉方式加入羧甲基纤维素(CMC),搅拌 20 min。

2.2.2 沿线跟进补浆浆液:无粘土聚合物浆液

由纯聚丙烯酰胺(PAM 2000 万分子量)配制,对数据进行对比分析,根据施工现场要求,得出同步注浆膏状浆液配方。

PAM 2000 万分子量纯浆液流变性见表 4。

从图 7~10 可知,PAM(2000 万分子量)纯溶液漏斗粘度、动切力、稠度指数随 PAM 加量增加而上升,流性指数随之下降。其中流性指数在 0.25%的 PAM 配比下达到试验最高值,沿线跟进补浆浆液主要突出润滑减阻特性,因此选此 PAM 配比为无固相聚合物浆液优化配方。由表 4 可知,浆液失水量随 PAM 加量的增加而减小,可以得出 PAM 具有降失水的作用。

通过以上试验得出最优沿线跟进补浆浆液配方:0.25%PAM(2000 万分子量)+100%水。

此配方浆液性能参数:漏斗粘度 124.5 s、塑性粘度 25 mPa·s、动切力 25 mPa、表观粘度 27.5 mPa·s、流性指数 0.874、稠度指数 0.064、失水量 14.4 mL。

配制方法:加水 60%~80%搅拌下慢慢撒粉方式加入 PAM(2000 万分子量)搅拌 40 min,加入余量水搅拌 5 min。

表 4 PAM 2000 万分子量纯浆液流变性测试

试验编号	基浆配方 PAM/%	漏斗粘度/s	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/mPa	表观粘度/(mPa·s)	失水量/mL	流性指数	稠度指数
1	0.50	248.19	18	160	34.0	4.0	0.444	1.572
2	0.40	164.04	20	100	30.0	5.5	0.585	0.521
3	0.30	134.13	23	55	28.5	8.8	0.745	0.163
4	0.25	124.50	25	25	27.5	14.4	0.874	0.064
5	0.20	70.12	14	35	17.5	27.0	0.737	0.106

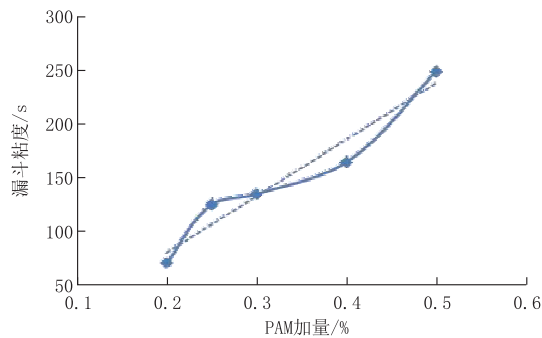


图 7 漏斗粘度变化曲线

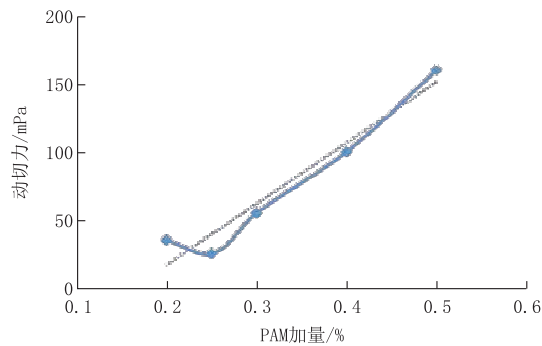


图 8 动切力变化曲线

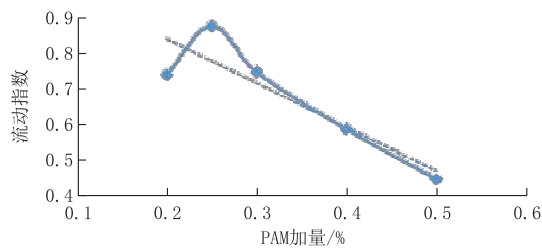


图 9 流性指数变化曲线

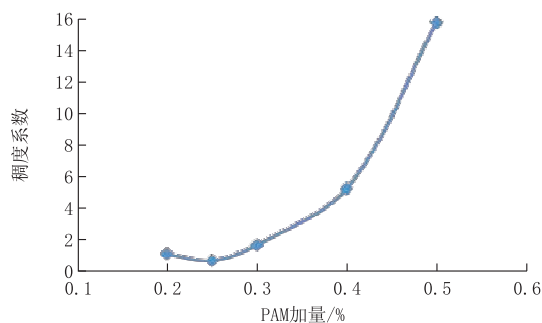


图 10 稠度指数变化曲线

高浓度高岭土聚合物浆液在流沙地层中主要起到改善砂层的不稳定性,以高浓度高岭土填充不良地层中的孔隙,提高浆液护壁堵漏的性能,形成完整的护壁泥浆套。这是降低后续跟进补浆浆液漏失,充分发挥润滑减阻性能作用的关键。无粘土聚合物浆液跟进补浆通过在管道外壁设置的注浆孔注入到地层与管道之中,主要起到润滑管道,降低管道与地层之间的侧摩阻力,控制顶力增长的作用。

3 工程应用

3.1 工程概况

本工程为乌兰布和生态沙产业示范区巴音湖输水穿沙管道工程,工程地点位于乌兰布和巴音湖南侧。巴音湖输水穿沙管线是乌兰布和生态沙产业示范区输水工程的关键管线,管线采用 DN3000 单管供水,由乌兰湖接出,从南向北穿越乌兰布和沙漠带,终点接至巴音湖。线路全长 1.52 km,共设临时顶管井 5 座,其中工作井 2 座、接收井 3 座,将全长分为 1 个 250 m 长的试验段和 3 个 423.3 m 长的顶段(参见图 11)。本文所研究的浆液用于 7~9 号顶段。顶管工程管材采用特种 F 型钢承口钢筋混凝土管,顶管全长 1520 m。每段顶管工程量见表 5。

表 5 顶管工程数量

序号	顶段	顶距/m	直径
1	2~1 号	250.0	DN3000(试验段)
2	2~4 号	423.3	DN3000
3	7~4 号	423.3	DN3000
4	7~9 号	423.3	DN3000

施工区主要以第四系中更新统冲基层(Q₂^{el})为主,自上而下土层主要为:松散粉砂层、稍密粉砂层、中密粉砂层,中密粉砂层中存在部分粉土层和圆砾层,其中圆砾层岩性为级配不良砾,中密,一般粒径 1.00~2.00 cm,最大可见粒径约 4.00 cm。管道所处标高为 1071~1072 m,地层变化不大,为稍密一

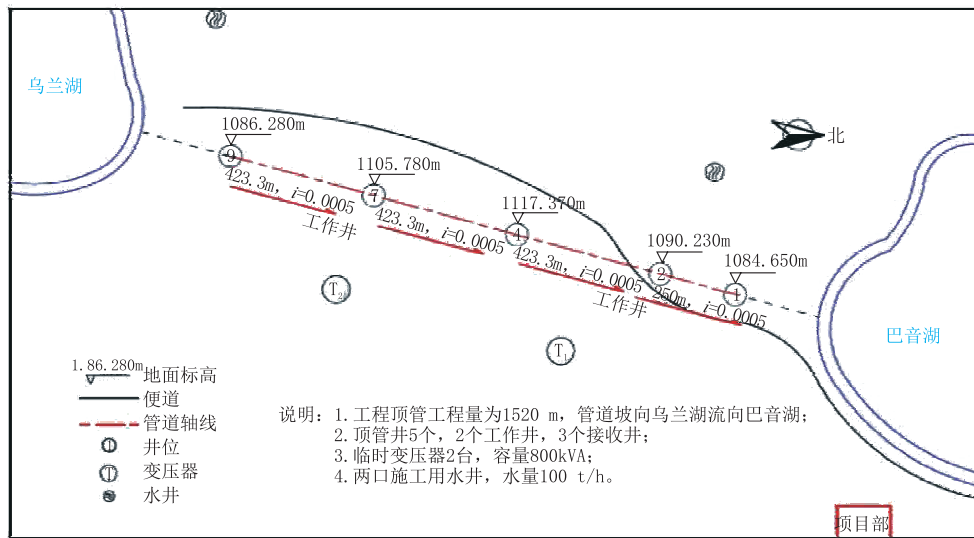


图 11 施工总平面布置图

中密粉砂土。根据地勘报告所示,本次顶管施工范围内未见地下水,且井底四周有钻孔灌注桩、高压旋喷桩加固土体,可不考虑地下水的影响。根据附近地下水资料参考,地下水为大概位于管道底部 2 m 位置。

3.2 注浆方法

该工程应用了同步注浆和跟进补浆的方法。

同步注浆就是在管道顶进过程中将护壁浆液通过机头处设置的注浆孔注入到开挖地层中,顶进前即开始注入,并且在顶进中持续注入,达到护壁浆液能在管道顶进过程中提前渗入周边地层对其性质进行改良形成稳定泥浆套。

跟进补浆则是通过在管道外壁设置的注浆孔注入到地层与管道之中,主要起到润滑管道,降低管道与地层之间的侧摩阻力,控制顶力增长的效果。

3.3 监测数据分析

3.3.1 顶力变化分析

通过现场工程应用中对顶力数据的反馈统计,对 7~4 号顶段、7~9 号顶段进行顶力变化趋势图的绘制(见图 12、图 13)。7~4 号顶段机头同步注浆采用 13% 膨润土 + 0.15% CMC + 0.2% NaOH + 100% 水,跟进补浆采用 0.45% PHP + 100% 水。7~9 号顶段采用了本文浆液方案,对两个顶段进行对比分析。

7~9 号顶段前 25 m 未进行注浆作业,25 m 后开始注浆,机头同步注浆配比为 17.5% 高岭土 + 0.025% CMC + 0.2% NaOH + 100% 水。根据顶力

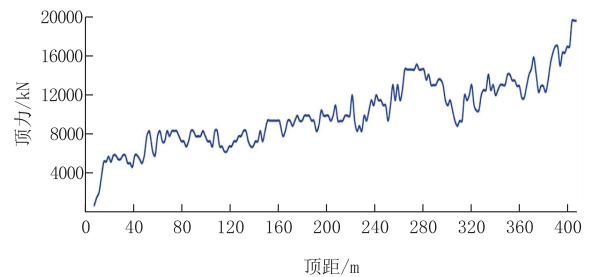


图 12 7~4 号顶段顶力变化趋势图

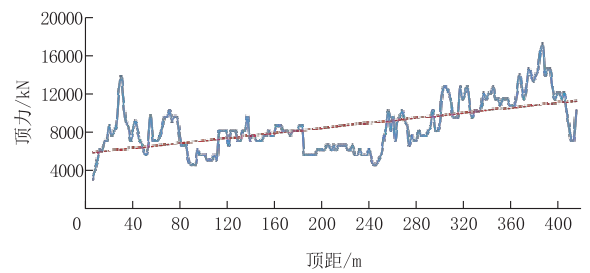


图 13 7~9 号顶段顶力变化趋势图

变化数据及注浆情况,结合现场记录确定泥沙层广泛分布在 64~110 m 段以及 185~253 m 段,粘土层分布于 110~185 m 段,其余为干流沙地层。由图 13 可知,顶力在粘土段明显高于附近顶段中的泥沙层,分析得出粘土段中顶管顶进过程中的正面阻力远大于泥沙层。顶力在整个顶进过程中比较平稳。

对比图 12、图 13 顶力变化趋势可知,7~4 号顶段后程中出现了顶力波动、不稳定现象,而 7~9 号顶段中采用了高浓度高岭土护壁浆液配合跟进润滑浆液,顶力得到明显控制。在泥沙层中顶力维持在

6000 kN 左右,粘土层中维持在 8000 kN 左右,干流沙地层中顶力曲线平稳上涨。

3.3.2 注浆量监测分析

通过现场工程应用中对注浆量的监测,对 7~4 号顶段、7~9 号顶段进行注浆量变化趋势图的绘制(见图 14、图 15)。对两个顶段进行对比分析。

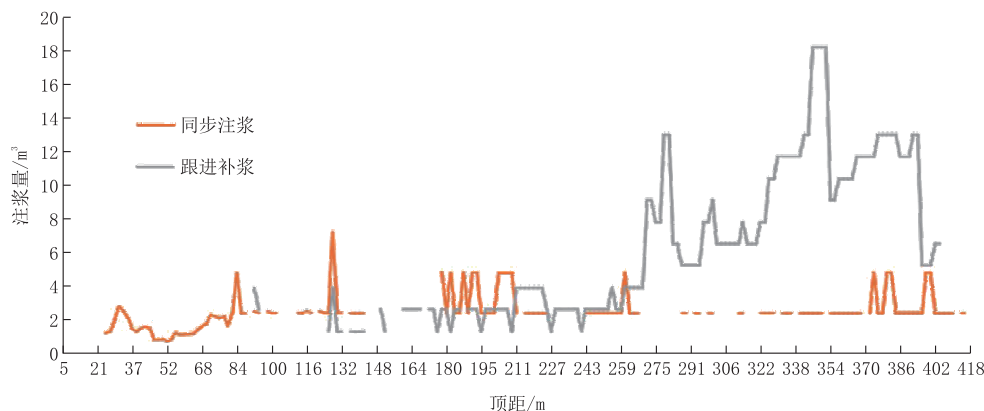


图 14 7~4 号顶段顶管注浆量变化图

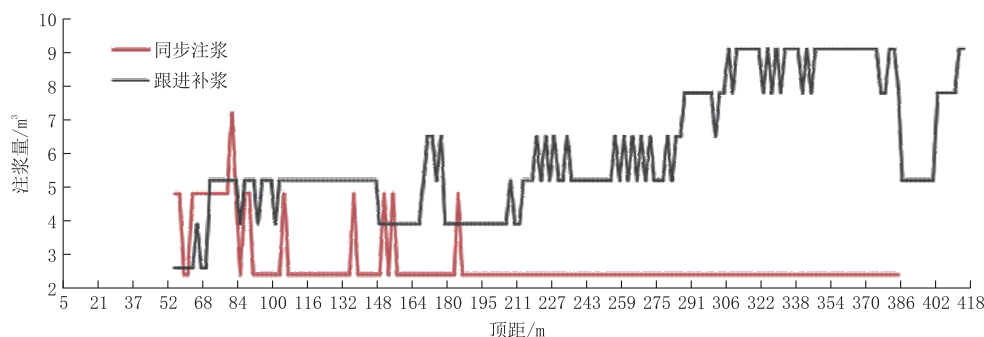


图 15 7~9 号顶段顶管注浆量变化图

由图 15 可知,7~9 号顶段中同步注浆量在顶进过程中趋于平稳状态,变化不大。而跟进补浆量则随着顶距的增长而上升,由于润滑浆液需要及时补充管道与地层间的空隙,达到减小管壁与砂层间摩擦力的效果,随着顶距增长而上升的跟进补浆量属于合理情况。

对比图 14、图 15 注浆量变化趋势可知,7~4 号顶段中跟进补浆在后程出现注浆量异常增大的情况,同时该顶段顶力也在后程出现波动不稳定现象。根据分析,跟进润滑浆液注浆量异常是由于同步护壁浆液护壁效果不佳导致润滑浆液出现漏失而造成的。跟进补浆日注浆量在 10 m^3 以上波动,峰值达到了 18 m^3 。而 7~9 号顶段采用了本文针对流沙地层而研制的高浓度高岭土护壁堵漏浆液有很好的护壁效果,跟进浆液注浆量随顶距增长而稳定上升,前期日注浆量保持在 4 m^3 左右,后期保持在 8 m^3 。

通过顶段 7~4 号与顶段 7~9 号顶力变化和注浆量监测数据对比分析可知,本文针对流沙地层所

研制的护壁减阻浆液在实际工程应用中得到了显著的效果,有效地控制了顶进过程中顶力的稳定,降低了浆液在不良砂层中漏失严重的情况,研制的浆液具有很好的实用价值。

4 结论

(1)研发了适合沙漠地层顶管的新型护壁减阻浆液。根据室内浆液性能测试数据以及该工程地质条件,得到护壁减阻浆液的最优配方为,机头同步注浆浆液配方 17.5% 高岭土 + 0.025% CMC + 0.2% NaOH + 100% 水;沿线跟进注浆浆液配方 0.25% PAM(200 万分子量) + 100% 水。

(2)整个注浆系统由同步注浆和跟进补浆两部分组成。同步注浆采用高浓度高岭土聚合物浆液为注浆材料,以成套护壁为主要目的;跟进补浆采用无粘土高聚物浆液为注浆材料,以润滑减阻为主要目的。两套注浆系统相辅相成,使得流沙地层顶管工程注浆技术发挥出护壁减阻双重效果,保障管道顶

进的顺利完工。

(3)高岭土聚合物浆液和无粘土聚合物浆液都属于假塑性流体,具有很好的紊流减阻特性,解决了长距离顶管浆液输送难题。高浓度高岭土聚合物浆液具有良好的护壁堵漏、保护孔壁稳定、失水量低特性,无粘土聚合物浆液具有良好润滑减阻性能,这些特性为流沙这一类高漏失性地层顶管工作的顺利进行提供了有力的保障。

(4)研发的顶管施工注浆护壁减阻材料在工程应用中取得了显著的成果,改善了流沙地层顶管项目中浆液漏失严重、顶力变化不稳定的状况,有极大的推广应用价值及经济社会效益。

参考文献:

- [1] 何利民,高祁.油气储运工程施工[M].北京:石油工业出版社,2015.
- [2] D. N. Chapman, C. D. F. Rogers, H. J. Burd, et al. Research needs for new construction using trenchless technologies[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(5-6):491-502.
- [3] Greta Vladeanu, John C. Matthews. Analysis of risk management methods used in trenchless renewal decision making[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 72:272-280.
- [4] Vera Gerasimova. Underground engineering and trenchless technologies at the defense of environment[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 165:1395-1401.
- [5] 马保松.非开挖工程学[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [6] Ma B, Najafi M. Development and applications of trenchless technology in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2008, 23(4):476-480.
- [7] Najafi M. *Trenchless technology piping: Installation and inspection*[M]. [S.l.]: McGraw Hill Professional Publishing, 2010.
- [8] 谢尔勒.马.顶管工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [9] Zhao Y, Wu J, Xie X, et al. Ground-penetrating radar measurement of the distribution of thixotropic slurry behind large-diameter segments in longdistance pipe-jacking construction[J]. *Near Surface Geophysics*, 2016, 14(2):171-181.
- [10] Zhen L, Chen J J, Qiao P, et al. Analysis and remedial treatment of a steel pipe-jacking accident in complex underground environment[J]. *Engineering Structures*, 2014, 59(2):210-219.
- [11] 贾蓬,焦程龙,张雯超.沈阳地区大直径顶管顶力预估与减阻效果的数值模拟[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(8):1206-1209.
- [12] 王春婷,隆威.大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J].*铁道科学与工程学报*, 2014, 11(1):106-111.
- [13] Khazaei S, Wu W, Shimada H, et al. Effect of Lubrication Strength on Efficiency of Slurry Pipe Jacking[C]// *Geoshanghai International Conference*.2006:170-177.
- [14] Shimada H, Khazaei S, Matsui K. Small diameter tunnel excavation method using slurry pipe-jacking[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2004, 22(2):161-186.
- [15] Pellet-Beaucour A L, Kastner R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunneling operations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2002, 17(1):83-97.
- [16] K. Shou, J. Yen, M. Liu. On the frictional property of lubricants and its impact on jacking force and soil-pipe interaction of pipe-jacking[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25: 469-477.
- [17] Ni J C, Ge L, Cheng W C. Variation of slurry pipe jacking force in coarse and fine soils[C]// *Geochina International Conference Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Technologies for Severe Weathers and Climate Changes*. 2016.
- [18] Khazaei S, Shimada H, Matsui K, et al. Analysis and Prediction of Thrust in Using Slurry Pipe Jacking Method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(4-5):356.
- [19] 喻军,李元海.顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响[J].*土木工程学报*, 2015, (S2):327-331.
- [20] 魏纲,徐日庆,邵剑明,等.顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J].*岩土力学*, 2004, 25(6):930-934.
- [21] 余彬泉.顶管施工技术[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [22] Zhang P, Ma B, Zeng C, et al. Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date: A case study of Gongbei tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59:134-145.
- [23] Ji X B, Zhao W, Jia P, et al. Pipe Jacking in Sandy Soil Under a River in Shenyang, China[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2016, 47(3):1-15.
- [24] Jianfeng Wang, Kang Wang, Tao Zhang, Shuai Wang. Key aspects of a DN4000 steel pipe jacking project in China: A case study of a water pipeline in the Shanghai Huangpu River[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018.
- [25] Fuyan L, Chunhui L, Hao L, et al. Experimental research of how the boundary layer lower the pipe drag reduction in transport of dense paste[J]. *Lubrication Science*, 2017.