

生物质料作用的顶管触变泥浆降摩改良性能试验研究

文 / 蓝旭坤 广东粤海粤东供水有限公司

李嘉诚 河北省地面塌陷机理与防控重点实验室

张中杰 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司

吕祥锋 河北省地面塌陷机理与防控重点实验室(通讯作者)

摘要:为解决富水硬岩顶管顶进过程中摩阻力过大,减摩泥浆性能降低等问题,采用物理试验及工程实践相结合的研究方法,分析了生物质料与CMC(羧甲基纤维素)的协同作用机制,研究了生物质料和CMC对减摩泥浆性能影响规律,确定了以膨润土、CMC和生物质料为主要原料的生物质料减摩泥浆的最优配合比,并在韩江榕江练江水系连通后续优化工程硬岩顶管项目中验证了该配比的有效性。研究表明:(1)聚合物与生物质料在抗水流冲刷方面具备协同效应,生物质料与CMC能够使减摩泥浆抗水流冲刷损失速度及摩擦系数显著降低;(2)一种适用于工程中的生物质料减摩泥浆,其配合比为20.0%膨润土、0.10%纯碱、0.40%CMC、3.0%生物质料和76.5%水;(3)将生物质料配合比应用到现场试验段,注浆前后试验段顶力出现明显降低的趋势,其抗水性显著优于传统减摩泥浆,涌水量相较于未注浆时降低了80%左右。研究结果为富水硬岩顶管防止卡盾提供了理论依据和试验数据支撑。

关键词:顶管;触变泥浆;生物质料;抗水降摩;试验研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.017

引言

在超硬岩顶管施工中,卡盾现象频繁发生,严重影响了施工进度和安全性。造成这类现象的主要原因是施工过程中减摩泥浆在富水环境下降摩性能的降低,导致顶管机无法顺利推进^[1-5]。因此,如何改良泥浆的抗水性与降摩性能,保证顶管施工的顺利进行,成为了当前亟待解决的技术难题。研究新型生物质料减摩泥浆,能够减小富水岩层施工时的摩擦阻力,通过优化泥浆配方,不仅为解决超硬岩顶管施工中的卡盾问题提供了有效方案,还能推动绿色环保材料的应用,提升工程施工的整体效益。

一、生物质料触变泥浆改良研究

(一) 抗水降摩协同作用原理

工程中常采用高压注浆设备将触变泥浆填充至地层与管壁之间的超挖间隙,通过水分子向地层迁移,在近地层侧形成低透水性且密实的胶质泥浆套^[6],从而持续阻水并减少顶进摩阻力。然而,传统触变泥浆在硬岩尤其地下水发育地层中适用性差,因水流反向渗入会导致泥浆结构分解、粘聚力下降,无法有效形成泥浆套。为此,可通过提升泥浆粘聚力和抗水流性能进行改良:一方面增加聚合物以强化三维网络结构,增强粘聚力、屈服应力和抗冲刷性;另一方面引入生物质料疏水组分,形成疏水油膜以降低摩阻,并增强抗渗能力,通过双重协同机制显著提升泥浆的稳定性与抗冲刷性能。

(二) 配比参数设计

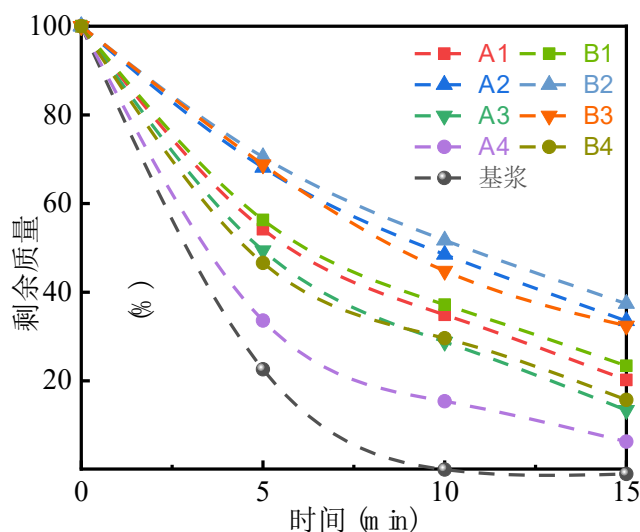
以工程中常见的20.0%膨润土+1.0%纯碱作为基浆,编号为T1。向基浆中加入不同量的CMC与生物质料:

定CMC在A组含量为0.30%,B组为0.35%,C组为0.40%,D组为0.45%;生物质料在1组含量为1.0%,2组为2%,3组为3%,4组为4%。字母与数字交叉共17组配比。

由于本试验研究的新型生物质料触变泥浆其主要作用并非是靠泥浆套减小摩阻力,而是靠其高粘聚力及疏水性抵御水流冲刷,因此本研究不同配比的抗水流冲刷性能及降摩性能。

(三) 抗水性能模型试验研究

将不同配比的足量泥浆摊铺在钢面层上,摊铺厚度为0.5cm,记录质量,用恒定流速为1.0m/s的水流冲刷泥浆层并记录时间,在5min、10min、15min时,沥干水分后测定剩余质量并计算所占百分比。设置平行试验为3组。



(a) A-B组

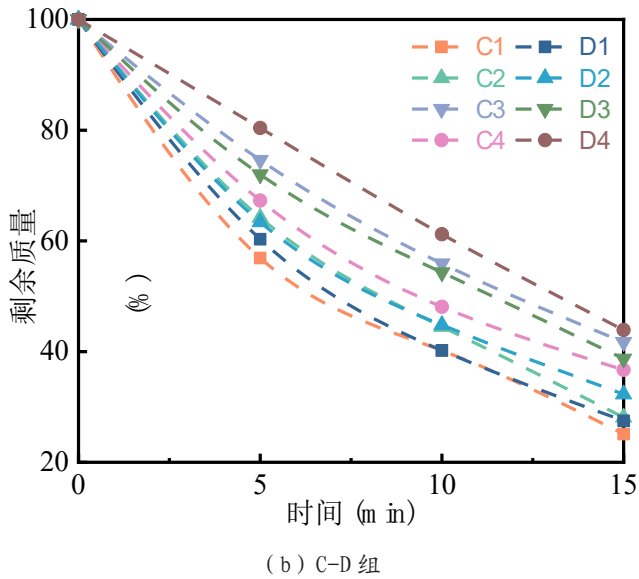


图1 不同组别配比抗冲刷性能

图1中横轴为水流冲刷时间，纵轴为剩余质量百分比。图中显示，基浆几乎无抗冲刷性，10分钟内即被稀释冲蚀；A组中A2配比因CMC与生物材料比例协调，能形成均匀稳定的网格结构，优化油相分布，在粘聚力和成膜性之间达到平衡，协同增强抗水性能。随CMC用量增加，相应所需生物材料相应提高，B2、B3、C3以及D3、D4均表现出优异抗冲刷性，泥浆损失速率最低。此外，当CMC与生物材料能够发挥出最佳的协同作用时，冲刷曲线更近似于一条直线，表明其抗冲刷性质较稳定；而当配比中CMC或生物材料某一含量相对过高时，冲刷曲线更近似于“C”型或“S”型，表现为不稳定的抗冲刷性质。

(四) 降摩性能模型试验研究

将不同配比的足量泥浆摊铺在石质底板上，用恒定流速为1.0m/s的水流冲刷泥浆层使泥浆表面保持湿润，将一钢质滑块放置试验泥浆层之上，与力值感应器连接

牢固，启动恒速电机，向钢制滑块施加拉力，提取力值感应器数字，数字平稳时计为一组有效数据。设置平行试验为3组。

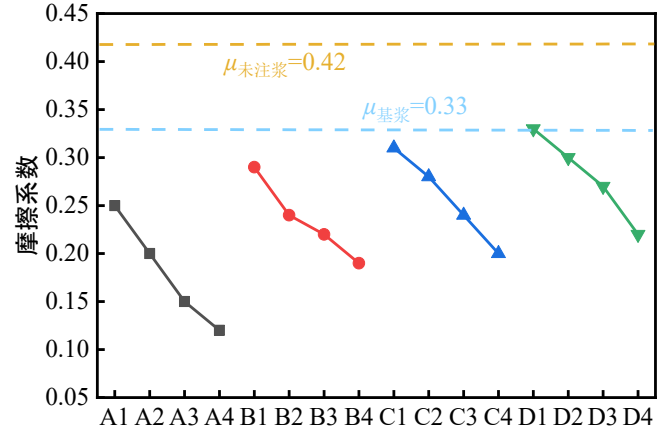


图2 摩擦阻力模型试验数据分析

摩擦阻力模型试验结果如图2所示。未注浆状态下，摩擦系数为0.42，基浆状态下降至0.33，说明即使未添加生物材料和CMC，基础泥浆已有一定的减摩效果。从整体角度分析，适量的CMC可以有效增强泥浆的结构稳定性，防止泥浆分散，但若CMC含量过高，反而会导致泥浆的流动性降低，摩擦系数上升，减摩效果反而变差。生物材料的添加对摩擦系数具有显著的降低作用，以A组为例：随着生物材料掺量增加，摩擦系数由0.25逐步下降至0.12，降幅高达52%。这表明生物材料释放出的油脂在泥浆中形成了有效的疏水油膜，减少了泥浆与管壁黏附摩擦力，从而显著提升了泥浆减摩性能。

五组性质较优的生物材料触变泥浆性质总结见表1。其中C3组的摩擦系数为0.22，同时其损失速度为3.89%/min，略快于D4组。考虑到工程中泥浆应用量大，牺牲部分损失速度可以节省成本，综合效益考虑，C3组更适合实际应用。

表1 五组性质较优的生物材料触变泥浆

组别	B2	C3	C4	D3	D4
损失速度 / (%/min)	4.17	3.89	4.22	4.09	3.84
摩擦系数	0.24	0.22	0.20	0.27	0.23

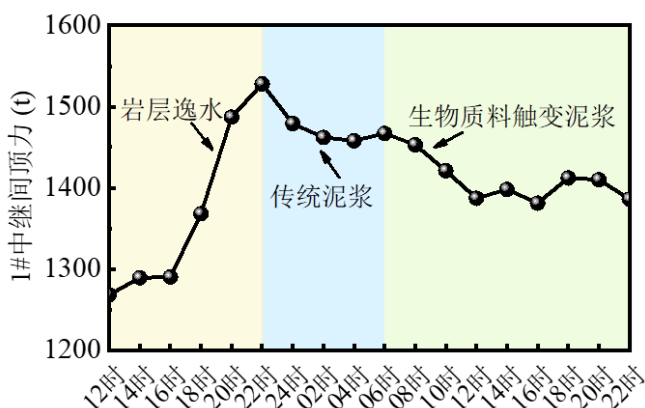
二、生物材料触变泥浆工程应用分析

韩江榕江练江水系连通后续优化工程硬岩顶管项目位于广东省汕头市。CYB7到CYB8顶管区间地层岩石硬度大，顶管穿越地质破碎带及龟山水库，地层含水量大，

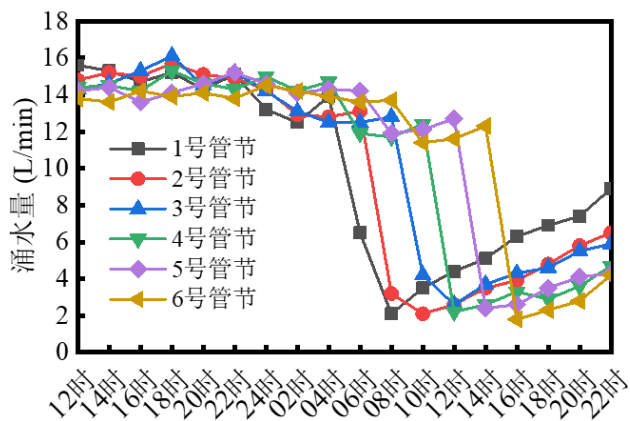
极易造成顶管卡盾的问题。在7月29日顶管岩层出现逸水现象。在22时左右开始采用触变泥浆进行注浆作业，在次日06时开始注入生物材料触变泥浆。选择逸水最为严重的1-6号管节作为试验段，每两小时记录

一次中继间顶力，并打开位于每节管节底部的清渣口，记录涌水量。

从图3中可以看到岩层逸水导致中继间顶力持续提升至1528 t，同时试验段涌水量平均在15.2 L/min左右，传统触变泥浆改善了管壁与岩层间的摩擦环境，顶力与涌水量略有下降，最低顶力为1458 t；在注入生物物质料触变泥浆后二者呈现出明显的下降趋势，最低顶力为1381 t，管节涌水量的平均值在2.2 L/min左右，表明在动水环境中生物物质料触变泥浆的降摩效果显著优于传统触变泥浆，但需要注意的是在后续顶管时应进行补浆。



(a) 顶力



(b) 涌水量

图3 生物物质料触变泥浆工程应用效果分析

结语

(1) 通过开展抗水流冲刷试验和摩擦阻力试验，确定了生物物质料与CMC在抗水流冲刷方面具有作用机制的协同效应。(2) 确定了一种适用于工程中的生物物质料触变泥浆，其配比为20.0%膨润土、1.0%纯碱、0.4%CMC、3.0%生物物质料和75.60%水，在动水环境中损失速度为3.89%/min，摩擦系数为0.22。(3) 该生物物质料触变泥浆应用

实际，注浆前后试验段顶力出现明显降低的趋势，涌水量相较于未注浆时降低了80%左右。

参考文献

- [1] 陈湘生, 付艳斌, 陈曦, 等. 地下空间施工技术进展及数智化技术现状 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(01): 1-12.
- [2] 钟祖良, 刁小军, 刘新荣. 长距离深埋岩石地层顶管摩阻力计算方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 2063-2070.
- [3] 赵彦春. 超长距离岩石顶管工程沉渣处理研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S2): 772-776+784.
- [4] 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(01): 106-111.
- [5] 张雪, 万中正, 王传银, 等. 无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(05): 1611-1620.
- [6] 刘招伟, 杨朝帅. 矩形顶管隧道施工中触变泥浆套形成规律及减阻效果试验 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(04): 568-576.
- [7] JIN L H, WU B J, Zheng X Z, et al. Development and Field Application of an Automated Pipe Jacking Friction Resistance Identification and Warning System in Construction [J]. APPLIED SCIENCES-BASEL, 2023, 13(23): 12813.
- [8] 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(01): 106-111.
- [9] 张雪, 万中正, 王传银, 等. 无水砂层中矩形顶管施工用减摩泥浆配合比优化及减阻性能试验 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(05): 1611-1620.
- [10] 赵勇胜, 戴贞洧. 海泡石改性土-膨润土泥浆阻截墙阻截地下水重金属阳离子污染 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(05): 1549-1559.
- [11] M. Mohammadi; M. Kouhi; A. Sarrafi, et al. Studying rheological behavior of nanoclay as oil well drilling fluid [J]. Research on Chemical Intermediates, 2015, 41(5): 2823-2831.
- [12] 陈湘生, 王雷, 阳文胜, 等. 双洞密贴顶管法装配式地铁车站建造方案及其力学性能研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(07): 1089-1098.