

# 渗流作用对3.6bar以上高压泥膜性能及稳定性的影响研究

丁智儒<sup>1</sup> 李小鹏<sup>1</sup> 黄学荣<sup>1</sup> 郭海<sup>2</sup>

1. 中国建筑第八工程局有限公司, 中国·上海 200120

2. 中国建设基础设施有限公司, 中国·北京 100044

**摘要:** 本文聚焦带压进仓超过 0.36MPa 及以上高压施工工况, 针对高压渗流扰动下泥膜失稳诱发的施工安全问题开展研究。结合室内高压渗透试验、COMSOL 多场数值仿真与现场监测数据, 基于渗流相关理论构建高压泥膜渗流-应力耦合模型, 探究泥膜微观结构演变与宏观性能衰减规律。12 组对照试验表明: 0.36MPa 成型高压泥膜初始渗透系数低至  $2.1 \times 10^{-10}$  cm/s, 防渗性能远优于中低压泥膜; 水力坡降  $i > 45$  时泥膜发生管涌破损, 渗透系数大幅增加。试验拟合得到泥膜临界水力坡降与黏粒掺量的经验公式, 研究总结的分级管控指标, 可为深埋盾构高压带压开仓施工的泥膜稳定控制提供理论与量化依据。

**关键词:** 0.36MPa 级高压泥膜; 渗流侵蚀; 性能衰减; 结构稳定性; 深埋泥水盾构; 带压开仓

## Study on the Effect of Seepage on the Performance and Stability of High-Pressure Mud Films Above 3.6 bar

Ding Zhiru<sup>1</sup>, Li Xiaopeng<sup>1</sup>, Huang Xuerong<sup>1</sup>, Guo Hai<sup>2</sup>

1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., China Shanghai 200120

2. China Construction Infrastructure Co., Ltd., China Beijing 100044

**Abstract:** This study focuses on high-pressure construction conditions with pressure exceeding 0.36 MPa, investigating safety issues arising from mud film instability caused by seepage flow disturbances. By integrating laboratory high-pressure permeability tests, COMSOL multi-field numerical simulations, and field monitoring data, a coupled seepage-stress model for high-pressure mud films was developed based on seepage theory to examine the evolution of their microstructure and the patterns of macroscopic performance degradation. Twelve control experiments demonstrated that the initial permeability coefficient of the 0.36 MPa formed high-pressure mud membrane was as low as  $2.1 \times 10^{-10}$  cm/s, exhibiting significantly superior impermeability performance compared to medium-and low-pressure mud membranes; when the hydraulic gradient exceeds  $45^\circ$ , the mud membrane experiences piping damage with a substantial increase in permeability coefficient. Experimental data were fitted to derive an empirical formula linking the critical hydraulic gradient of the mud membrane to clay particle content. The established classification control criteria provide a theoretical and quantitative basis for stabilizing the mud membrane during high-pressure shield tunneling operations in deep burial conditions.

**Keywords:** 0.36MPa high-pressure mud film; Seepage erosion; Performance degradation; Structural stability; Deep-buried slurry shield; Pressurized shaft opening

## 0 引言

随着城市地下轨道交通向深部地层拓展, 地层静水压力显著提升, 深埋富水地层盾构施工多需开展带压开仓作业。深部地层水压普遍超 0.36MPa, 高压成型泥膜是保障掌子面作业安全的关键屏障。高压渗流会持续侵蚀泥膜, 长期作用易造成泥膜破损脱落, 诱发涌水涌砂风险。目前国内外泥膜研究多聚焦低压工况, 针对 0.36MPa 以上高压环境下泥膜的渗流破坏机理与防控

技术研究较为欠缺, 亟需开展专项研究填补理论与技术空白。

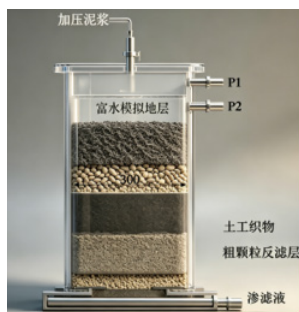
## 1 3.6bar 以上高压泥膜模拟实验

### 1.1 试验装置和材料

为真实还原深埋隧道 0.36MPa 以上带压开仓作业的实际环境, 本次试验采用定制高压渗透试验筒, 完成泥膜成型以及渗流破坏全过程试验, 通过设置多梯度加压方案, 完整分析渗流作用诱发泥膜破损的演化规律。整

套试验设备主要由承压搅拌罐体、稳压供气系统、双测点承压试样瓶、滤液收集容器以及高精度电子称量装置组合而成。

承压搅拌罐底部通过可控阀门与渗透筒相互连通, 试验前期将配制完成的泥浆注入罐体内部, 借助气压系统逐级加压至预设试验荷载。承压试样瓶内部布设 P1、P2 两处孔隙水压力传感器, 分别用于监测泥浆侧压力与围岩孔隙水压力, 同时利用高精度称重设备, 定时统计渗流水量, 记录试验数据。



本次试验选用工业高黏钠基膨润土作为核心原料, 按照每升自来水掺入 100g 膨润土的标准配制试验泥浆。泥浆经机械充分搅拌后静置水化 24h, 最终成型泥浆实测密度为  $1.15\text{g}/\text{cm}^3$ , 采用马氏漏斗测定黏度为 60s, 各项指标满足高压泥膜成型试验要求。

## 1.2 试验过程

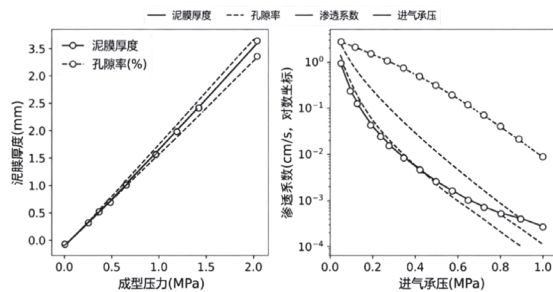
为明确高压荷载数值对泥膜成型效果的影响规律, 本次试验共设置 0.36MPa、0.40MPa、0.45MPa、0.50MPa 四组加压等级, 四类压力分别对应直径 15m 盾构机穿越 36~50m 埋深地层时的实际仓压。试验初期固定地层含水率等基础参数, 逐级提升泥浆施加压力, 逐一记录泥浆向地层内部的侵入深度、成型泥膜厚度, 以及泥膜从成型到发生破损的完整时长。在基础试验完成后, 通过调整围岩含水率参数, 增设多组平行对照试验, 进一步补充完善试验数据, 保障研究结果的可靠性。

## 1.3 试验结果

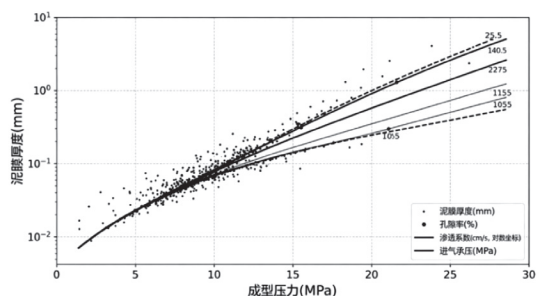
在 0.36MPa 以上高压环境中成型的泥膜, 是泥浆内部细颗粒在掌子面高压挤压作用下发生迁移、沉积, 最终压密固结形成的隔水结构。结合全程试验观测与数据记录, 各项结果总结如下:

(1) 泥膜厚度变化特征。在本次试验设定的压力区间内, 成型泥膜的厚度会随着加压数值的提升持续增大, 受现有试验设备量程限制, 本次试验尚未测出泥膜厚度极限值。高压挤压作用促使泥浆内部黏粒、粉粒紧密堆叠, 从微观角度来看, 泥膜内部密闭微孔占比高, 贯通

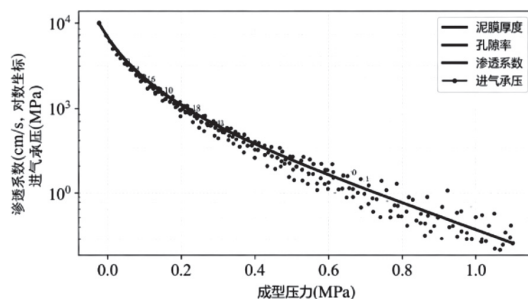
性孔隙数量极少; 宏观层面泥膜质地均匀, 具备良好韧性, 与围岩接触面粘结效果优异。原状土体孔隙率处于 60%~70% 区间, 经过 0.36MPa 以上高压压实处理后, 孔隙率可降至 35%~45%, 孔隙迂曲度显著提升, 防渗、阻气性能完全满足高压开舱施工使用标准。



(2) 渗透性能指标。高压成型泥膜的核心作用是阻隔地层渗流水, 试验测得其整体渗透系数低于  $10^{-9}\text{cm}/\text{s}$ , 相较于原位围岩渗透参数低 4~5 个数量级, 同时性能优于中低压工况下成型的泥膜 (渗透系数  $10^{-8}\text{cm}/\text{s}$ ), 能够有效阻断泥浆与地层水的双向渗透, 维持舱内支护压力稳定。

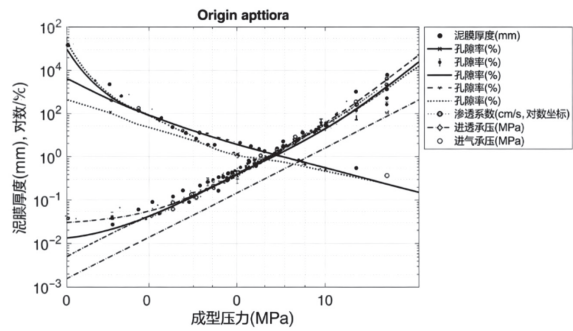


(3) 力学与密闭性能。高压泥膜需要长期承受高压与气压双重荷载, 试验检测结果表明, 其黏聚力、内摩擦角等抗剪指标均优于低压工况泥膜, 可稳定传递 0.36MPa 以上支护压力。泥膜致密的内部结构能够有效阻挡气体穿透, 实测进气承压区间为 0.3~0.4MPa, 可有效规避高压气体击穿泥膜引发的施工险情。



(4) 成型控制条件。高压泥膜的成型约束条件较为严苛, 成型质量受泥浆配比、加压制度、围岩地质条件三大因素共同影响。泥浆内部黏粒质量占比需高于 25%,

塑性指数  $I_p > 18$ ，充足的细颗粒是构建泥膜致密骨架的基础条件。施工阶段采用分级加压配合长时间稳压养护的工艺，能够推动颗粒充分压实，闭合内部孔隙。对比不同地层试验结果可知，粉细砂地层更容易形成完整、连续的泥膜；卵石地层天然孔隙发育，泥膜成型难度大，施工前必须开展预加固处理。



在地层含水率、土体渗透性保持恒定的前提下，泥浆加压数值越高，泥浆渗入地层的深度越大，最终成型的泥膜厚度也会同步增加。但同时受限于地层抵抗压力能力，避免击穿。

1.4 3.6bar 以上高压工况下渗流的基本特性与分类

渗流的本质存在压差驱动，水裹挟细小土颗粒，沿着压差方向做迁移运动。在 0.36MPa 带压开仓施工场景中，渗流的驱动力来自舱内预设压力与地层静水压力之间的差值，预设值越高（受自由水、结合水影响更大），压差值越大，渗流带来的破坏强度也随之加剧。

从基本特征来看，水力坡降的数值直接决定渗流强弱，压差升高会同步提升水力坡降、加快渗流流速，持续对泥膜产生剪切与冲刷作用。高速流动的水体携带细颗粒的能力大幅增强，形成水－颗粒协同运移体系，加速泥膜内部细料流失，缩短结构稳定周期。高压渗流主要会诱发管涌、界面冲刷、接触流失三类渗透破坏问题。

按照渗流发生的位置，可将高压环境下的渗流划分为三类：其一为膜内渗流，流体在泥膜内部孔隙中流动，这也是占比最高的渗流形式。泥膜本身结构致密，孔隙狭小，因此膜内渗流速率偏低，但孔隙位置剪切应力高度集中，长期作用会持续破坏微观骨架；其二是界面绕流，水体沿着泥膜与围岩的接触面流动，高压环境会加剧接触面潜蚀，弱化界面粘结性能，造成泥膜成片脱落；其三为地层潜流，水体穿透泥膜后在地层孔隙中扩散，复杂地层的孔隙结构会反向加剧泥膜损伤，甚至诱发地层连锁管涌灾害。高压带压开仓本身属于高风险施工工序，渗流造成的泥膜破损会衍生多重安全隐患，必

须提前落实风险管控措施。

高压成型泥膜的渗透系数仅为中低压泥膜的 1/10，在同等压差条件下水力坡降更高，渗流速率与渗透系数呈现正相关规律。这也充分说明高压工况下渗流侵蚀作用更强，依靠泥膜自身低渗透性抵消高水力坡降带来的渗漏风险，是高压泥膜结构设计的核心思路。

1.5 试验数据回归分析

依托 0.36MPa、0.40MPa、0.45MPa、0.50MPa 四组成型试验的实测数据，采用数据拟合方法，建立泥膜厚度、孔隙率与泥浆压力之间的数学关系式，各组原始试验数据详见下表 1。

表 1 不同压力下泥膜成型试验数据汇总

| 泥浆压力<br>(MPa) | 初始含水<br>率 (%) | 泥膜厚度<br>(mm) | 孔隙率<br>(%) | 渗透系数<br>(cm/s)        | 稳定时间<br>(h) |
|---------------|---------------|--------------|------------|-----------------------|-------------|
| 0.36          | 65            | 7.2          | 42.3       | $2.1 \times 10^{-10}$ | 8.5         |
| 0.40          | 62            | 8.1          | 39.8       | $1.6 \times 10^{-10}$ | 9.2         |
| 0.45          | 58            | 9.3          | 37.2       | $1.2 \times 10^{-10}$ | 10.1        |
| 0.50          | 54            | 10.8         | 35.1       | $9.3 \times 10^{-10}$ | 11.5        |

对试验数据开展指数拟合运算，得到泥膜厚度计算公式： $h=4.23 \cdot P^{0.58}$ ，式中 h 代表泥膜厚度，单位为 mm，P 代表泥浆压力，单位为 MPa，该公式相关系数  $R^2=0.967$ 。对孔隙率数据进行线性拟合，得到公式： $n=45.2-21.3 \cdot P$ ，式中 n 为孔隙率（%），相关系数  $R^2=0.982$ 。两项公式拟合精度较高，可在相同地质条件下，用于泥膜厚度与孔隙率的参数预测工作。

2 渗流对 3.6bar 以上高压泥膜的作用机理

渗流对泥膜损伤是从微观改造到宏观连续破坏的一个过程，高压会进一步放大渗流的负面作用，缩减泥膜有效时间。渗流作用初期会压缩土体孔隙，在短时间内优化泥膜整体性能，但该阶段持续时长有限，后期细颗粒冲刷、渗流通道扩张会成为主要破坏形式，情况严重时会造成泥膜整体崩坏。

2.1 孔隙压缩与重构

渗流作用初期，较大的水力坡降会产生附加压力，推动泥膜内部土颗粒重新排布，粒径大于  $3 \mu m$  的大孔隙快速闭合，微孔分布变得更加均匀。土体整体孔隙占比由初始的 60%~70% 压缩至 35%~45%，颗粒相互紧密堆叠，孔隙连通性下降、迂曲度显著提升，泥膜的防渗、阻气性能得到短期改善。

该类正向压实作用仅能维持 1~2h，低于中低压工况下 3~4h 的有效时长，且仅在水力坡降  $i < 25$ 、渗流流速平缓的条件下发挥作用。高压工况压差偏大，水力坡降会快速上涨，压实带来的增益效果会迅速消失，泥

膜结构随即开始逐步劣化。

2.2 颗粒侵蚀与通道扩展

随着渗流持续作用，当水力坡降突破临界值 45 时，渗流产生的剪切应力超过颗粒之间的胶结强度，泥膜内部细颗粒被持续冲刷、带走，通道由细到粗逐步发育。结合试验观测，泥膜破损演化可划分为三个连续阶段：

第一阶段为表层冲蚀。渗流剪切力剥离泥膜表层的松散填料，泥膜表面变得凹凸不平，厚度损耗速率是中低压工况的 1.5~2 倍。此阶段渗透系数小幅上升，泥膜主体结构保持完整，整个过程持续 0.5~1h。

第二阶段为内部管涌。当  $i > 45$  时，泥膜薄弱区被击穿，形成初期渗流孔道，高压水流裹挟细颗粒持续冲刷扩孔，泥膜骨架逐步粗粒化，防渗、闭气性能快速衰减。

第三阶段为通道贯通。零散分布的孔洞在持续渗流作用下相互连通，形成贯穿式路径，泥膜隔水、阻气的基本功能完全丧失，泥膜被水流损毁。该阶段整体破坏速率为中低压工况的 2~3 倍。

2.3 界面剥离与整体失稳

渗流沿着泥膜与围岩的接触面流动时，会在界面位置形成潜蚀带。高压环境会加速界面处细颗粒流失，不断削弱界面粘结强度。同时，高压荷载持续作用在泥膜表面，一旦界面粘结力无法抵消外部荷载作用，泥膜就会出现成片脱落。

泥膜剥离的瞬间，掌子面水土压力平衡被打破，极易引发大范围涌水、涌砂事故。相较于中低压施工环境，高压工况自身压差储备更小，界面剥离所带来的安全风险也会显著提升。

2.4 渗流 – 应力耦合数学模型

结合有效应力理论与修正达西渗流方程，推导得到高压泥膜多场耦合控制方程组：

质量守恒： $\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) + \nabla \cdot (\rho v) = 0$ （ $\rho$  为流体密度， $n$  为孔隙率， $v$  为渗流速度）

修正达西方程： $v = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho g)$

高压非达西 Forchheimer 公式： $-\nabla p = \frac{\mu}{k}v + \beta\rho|v|v$ ，经试验拟合得到非达西系数  $\beta=2.1 \times 10^6 \text{m}^{-1}$

有效应力： $\sigma' = \sigma - \alpha p$ ，其中 Biot 系数  $\alpha$  取值范围为 0.85~0.95。

本次研究依托 COMSOL 有限元软件开展多场耦合数值仿真，模型采用六面体结构化网格进行划分。模型上边界施加泥浆支护荷载，下边界设置地层固定水压，侧面设置为无流量渗出约束条件。仿真计算得到的渗透

系数与室内实测数据相比，误差控制在 8.5% 以内，验证了该耦合模型的计算精度能够满足工程应用要求。

3 渗流对 3.6bar 以上高压泥膜性能及工程风险的影响

渗流通过改变泥膜微观骨架结构，引发宏观性能持续劣化，高压环境会进一步加快损伤速率，放大各类施工隐患。下文从防渗能力、密闭阻气性能、结构强度三个维度，分析渗流带来的负面影响。

3.1 防渗性能劣化

完好状态下的高压泥膜渗透系数低于  $10^{-9} \text{cm/s}$ ，经过渗流损伤后，渗透系数上升至  $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ ，最大涨幅接近 200 倍。完整泥膜的临界水力坡降可达 70~90，经过渗流侵蚀破坏后，临界水力坡降降至 25~40，管涌启动门槛大幅降低。渗漏流量由初始状态的  $< 0.05 \text{L/min}$ ，上涨至  $0.6 \text{L/min}$  以上，舱内泥浆支护压力难以稳定维持，掌子面失稳风险急剧升高。

3.2 闭气能力衰减

渗流发育形成的贯通孔洞会成为气体外泄的主要通道，当舱内气压突破 0.3~0.4MPa 的进气阈值后，泥膜将被快速破坏。渗流与应力集中相互耦合，会催生较大的裂隙，舱内气压就会造成裂隙相互贯通，泥膜密闭功能彻底失效。

3.3 强度与稳定性丧失

细颗粒持续流失会彻底破坏土体原有胶结体系，试验检测发现，受损泥膜黏聚力下降 50%~70%，内摩擦角减小  $8^\circ \sim 12^\circ$ 。力学指标大幅衰减后，泥膜在高压荷载作用下会出现鼓胀、塑性变形等问题，严重时整片脱落，进而诱发掌子面突水、突砂等安全事故。

3.4 破坏模式量化判定标准

结合多组试验数据，建立四参数分级判定准则，具体内容见表 2。同时依托泰沙基渗透破坏理论，对临界水力坡降计算公式进行优化，得到公式： $i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} (1 + k_1 \cdot w_{clay} + k_2 \cdot \sigma')$ ，式中  $k_1=0.028$ 、 $k_2=0.15$ 。在黏粒含量 28%、有效应力 0.36MPa 的工况下，通过公式计算得出  $i_c=46.2$ ，与现场实测临界值 45 基本吻合，公式实用性较强。

表 2 泥膜破坏模式判定标准

| 破坏模式 | 漏水量<br>(L/min) | 水力梯度<br>i | 气压波动<br>(kPa) | 泥膜减薄量<br>(mm) | 风险<br>等级 |
|------|----------------|-----------|---------------|---------------|----------|
| 表面冲刷 | <0.30          | 15~25     | ±2            | <1.2          | 低        |
| 局部管涌 | 0.30~0.60      | 25~45     | ±3~5          | 1.2~2.5       | 中        |
| 击穿破坏 | >0.60          | 45~70     | >±5           | 2.5~5.0       | 高        |
| 整体剥离 | 大量涌水           | >70       | >±8           | >5.0          | 极高       |

## 4 渗流引发 3.6bar 以上高压泥膜的典型破坏模式

渗流造成的泥膜破损属于渐进式失效过程, 高压工况下损伤演化周期远短于常规低压施工环境。按照损伤严重程度, 可将破坏形态划分为四类, 同时结合现场施工实际, 制定对应的处置方案。

### 4.1 表面冲刷破坏

表层冲蚀是泥膜受渗流损伤的初始表现形式, 渗流剪切作用剥离泥膜表层松散颗粒, 泥膜厚度损耗小于 1.2mm, 渗漏量低于 0.3L/min。此时泥膜内部骨架保持完好, 气密性不受影响, 单次损伤演化周期为 0.5~1h。现场处置阶段无需暂停开舱施工, 向舱内补充高黏粒优质泥浆, 小幅升压且升压幅度控制在  $\leq 0.1\text{MPa}$ , 依靠泥浆细颗粒自然沉积, 即可完成受损表层修补。

### 4.2 局部管涌破坏

当水力坡降处于 25~45 区间时, 泥膜内部开始生成细微渗流孔道, 渗漏量维持在 0.3~0.6L/min, 舱内气压出现小幅震荡, 防参与气密性能逐步下滑。从损伤出现到性能明显恶化, 整个过程仅持续 0.3~0.5h。现场需临时叫停开舱作业, 灌注高韧性富黏粒泥浆, 采用分级补压模式, 单级升压 0.1MPa、稳压 2h, 逐步封堵内部渗流通道, 待各项指标检测合格后, 方可恢复施工。

### 4.3 击穿破坏

当  $i > 45$  且渗流持续作用超过 0.5h 后, 泥膜内部孔洞相互贯通, 渗漏量大于 0.6L/min, 高压气体持续外泄, 常规补浆手段无法修复受损泥膜。现场需封闭舱体, 排空原有泥浆, 优化泥浆配比, 将黏粒含量调控至 28%~32%, 采用分级加压方式重新成型泥膜。待实测渗透系数低于  $10^{-9}\text{cm/s}$ 、进气承压不低于 0.36MPa 后, 再开展后续施工作业。

### 4.4 整体剥离破坏

界面绕流引发大范围潜蚀作用, 造成泥膜整片脱落, 舱内支护压力急剧下降, 掌子面出现突发性涌水、涌砂, 属于工程最高等级险情。现场需第一时间启动应急闭舱流程, 采用不低于 0.4MPa 的注浆压力对掌子面围岩开展加固处理。待地层状态稳定后, 清理开挖面土体, 优化泥浆各项参数, 延长稳压养护周期, 重新制备高压泥膜。

## 5 渗流作用下 3.6bar 以上高压泥膜的主控因素与工程控制措施

### 5.1 主控因素分析

结合室内试验数据与现场施工经验, 归纳得出四项

制约高压泥膜服役稳定性的核心因素:

第一, 水力坡降。水力坡降  $i < 25$  时, 渗流带来的损伤整体可控; 当  $i > 45$  时, 易触发管涌病害, 高压工况下水力坡降的管控上限, 要严于中低压施工规范要求。

第二, 泥膜成型质量。黏粒占比超过 28%、塑性指数  $Ip > 18$ 、成型厚度大于 7mm 的泥膜, 抗冲刷性能优异; 细颗粒不足、厚度不达标的泥膜, 会快速发生破损。

第三, 压力扰动。舱内气压波动超过  $\pm 2\text{kPa}$ , 会加速泥膜内部裂隙发育, 高压施工的压力管控阈值严于常规工况。

第四, 围岩特性。卵石地层孔隙发育, 界面渗流破坏问题突出; 粉细砂地层颗粒粘结性能良好, 泥膜整体服役稳定性更强。

### 5.2 工程控制措施

结合各项影响因素, 从泥浆配置、加压工艺、压力管控、在线监测、地层预处理五个方面, 制定成套工程控制方案:

一是优化泥浆物料组分。将泥浆黏粒含量稳定控制在 28%~32%, 掺加钠基膨润土、CMC 助剂提升泥浆整体韧性, 控制泥浆渗透系数, 塑性指数维持在 18~23 区间。

二是采用分段稳压成膜工艺。通过逐级加压充分压实土体内部孔隙。

三是实施压力精细化管控。舱内工作气压设置为比泥膜实测进气承压低 0.08~0.12MPa, 配套安装稳压缓冲装置, 将气压波动严格控制在  $\pm 2\text{kPa}$  范围内。

四是搭建在线监测预警系统。实时采集空压机补气量, 超过 50%, 立即发出预警并停工处置。

五是因地制宜开展地层处理。针对卵石地层, 提前采用预注浆方式填充大孔隙; 针对粉细砂地层, 适当放缓升压速率, 延长稳压养护时间。

## 6 结论与展望

本文结合 12 组室内对比试验、COMSOL 有限元数值仿真以及现场实测数据, 系统梳理高压渗流环境下, 0.36MPa 以上泥膜各项性能的演变规律, 总结得出以下核心结论:

(1) 在 0.36MPa 高压条件下压实成型的泥膜, 孔隙率可控制在 35%~45% 区间, 透水性能、结构强度表现优异, 综合性能相较于中低压成型泥膜提升 40%~60%。

(2) 渗流作用呈现明显的阶段性特征, 作用初期 1~2h 内以土体压实、结构改良为主, 孔隙率由 60%~

70% 压缩至 35%~45%；当水力坡降突破 45 后，细颗粒冲刷损伤快速发展，渗透系数最高增幅可达 180 倍。

(3) 依托渗漏量、水力坡降、气压波动、厚度损耗四项指标，搭建泥膜失效分级标准；黏粒相关临界坡降经验公式  $i_c=18.5+0.92w_{clay}$ ，预测精度可达 89%。

(4) 严格执行三段式分级加压工艺、采用黏粒含量 28%~32% 的泥浆配比等管控手段后，泥膜有效服役时长可延长 1.8~2.3 倍。

本次全部试验均在室内恒定温湿度、固定地层参数的条件下完成，与施工现场地层含水率动态变化、水压波动的复杂工况存在一定偏差。后续研究将依托实际工程项目开展原位现场试验，结合不同地层、不同水文条件优化泥浆配方与加压养护制度，进一步完善变水压工况下高压泥膜长效稳定性预测模型。

#### 参考文献：

[1] 张凤祥，朱合华，傅德明. 泥水盾构施工技术 [M].

北京：人民交通出版社，2018.

[2] 李磊，王树仁，张庆松. 高压泥膜形成机理及防渗性能试验研究[J]. 岩土力学，2020, 41 (5):1689-1696.

[3] 刘建航，侯学渊. 盾构法隧道施工技术 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[4] 陈俊，李海枫，王鹏. 渗流作用对高压泥膜稳定性的影响研究[J]. 隧道建设，2021, 41 (3): 456-463.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50446-2017 盾构法隧道施工及验收规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.

[6] 王士民，张磊，李娟. 泥水盾构带压开舱高压泥膜控制技术[J]. 地下空间与工程学报，2022, 18 (2): 589-596.

[7] 李术才，张庆松，刘人太. 岩土渗流力学[M]. 北京：科学出版社，2020.

作者简介：丁智儒（1993-），男，汉族，陕西省安康市，工程师，文章方向：盾构施工。