# 泥浆浸润作用下黏性土-金属黏附特性试验研究

毛家骅,李树忱,杨　晨,潘俊涛,王莹莹,周　鹏
(中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州　221116)

**摘要**:探明泥浆浸润环境下黏性土与金属的黏附规律是泥水盾构刀盘结饼和堵塞防治的关键.基于响应面试验设计方法,开展了考虑膨润土质量分数、初始稠度指数、泥浆浸润时间3个因素的黏性土-金属黏附应力测试试验,建立了黏附应力二次多项回归方程,并探讨了泥浆浸润作用下的黏附应力变化规律.研究结果表明:黏性土初始稠度指数对黏附应力的影响最为显著,且膨润土质量分数与初始稠度指数、初始稠度指数与浸润时间对黏附应力存在较为显著的交互影响;黏附应力随泥浆浸润时间增长均呈下降趋势,在短期浸润作用下,初始含水率较低的黏性地层往往更易导致刀盘及其他设备堵塞和结饼,而初始含水率较低,且膨润土含量较高的黏性地层在泥浆长期浸润作用下,峰值黏附应力降低较快;在泥浆浸润作用下黏性土-金属界面的黏附作用不仅仅取决于土样的含水率.研究成果能够为黏性地层泥水盾构刀盘堵塞风险评估与防治提供指导.

**关键词**:黏性土;泥水盾构;泥浆;黏附;含水率
**中图分类号**:TU 443　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-1964(2026)01-0232-12

# Experiment study on adhesion characteristics between cohesive soil and metal plate under slurry immersion

MAO Jiahua, LI Shuchen, YANG Chen, PAN Juntao, WANG Yingying, ZHOU Peng
(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Elucidating the adhesion mechanisms between cohesive soil and metal under slurry immersion is crucial for preventing clogging and cake formation on cutterhead in slurry shield tunneling. Based on the response surface methodology, an experimental study was conducted to investigate the adhesive stress between cohesive soil and metal, considering three factors: bentonite content ratio, initial consistency index, and slurry immersion time. A quadratic polynomial regression model for adhesive stress was established, and the variation patterns of adhesive stress under slurry immersion were analyzed. The results show that the initial consistency index of cohesive soil has the most significant influence on adhesive stress, with notable interactive effects between bentonite content ratio and initial consistency index, as well as between initial consistency index and immersion time. The adhesive stress generally decreases with prolonged immersion time. Under short-term immersion, cohesive strata with lower initial water content are more prone to causing clogging and cake formation on cutterhead and other equipment. In contrast, under long-term immersion, cohe-

**收稿日期**:2025-06-30　　**修回日期**:2025-09-01　　**DOI**:10.13247/j.cnki.jcumt.20250248
**基金项目**:国家重点研发计划项目(2024YFF0507904);国家自然科学基金项目(52508464);中国博士后科学基金项目(2024M753521)
**通信作者**:毛家骅(1990—),男,浙江省宁波市人,助理研究员.E-mail: jiahuamao1990@163.com
**引用格式**:毛家骅,李树忱,杨　晨,等.泥浆浸润作用下黏性土-金属黏附特性试验研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):232-243.
MAO Jiahua, LI Shuchen, YANG Chen, et al. Experiment study on adhesion characteristics between cohesive soil and metal plate under slurry immersion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 232-243.

sive strata with lower initial water content and higher bentonite content exhibit a more rapid reduction in peak adhesive stress. The adhesion behavior at the cohesive soil-metal interface under slurry immersion is not solely determined by the water content of the soil. The findings provide insights for risk assessment and prevention of cutterhead clogging in slurry shield tunneling in cohesive strata.

**Key words:** clay soil; slurry shield; slurry; adhesion; water content

泥水盾构因其精准的开挖面平衡控制与良好的地层适应性等优点，在隧道工程中得到了广泛应用[1]. 然而，随着大直径及超大直径隧道工程的增多，以及掘进距离的不断延长[2-3]，盾构遭遇富含黏性矿物成分地层的情况日益普遍. 例如，正在建设的甬舟铁路金塘海底隧道工程盾构需在黏性地层中掘进超过 3.6 km，而无锡—宜兴城际铁路太湖隧道工程盾构更需连续穿越长达 7.6 km 的黏性地层. 泥水盾构在黏性地层中掘进时，渣土极易附着于刀盘、刀具及管路等设备表面. 尤其是刀盘部位，随盾构掘进过程中的挤压脱水与摩擦升温，渣土不断堆积并形成坚硬的“泥饼”，如不及时处理，将导致刀盘堵塞、刀具磨损加剧、施工效率降低，甚至造成掘进中断，同时频繁开舱处理也带来较高的安全风险. 近年来，武汉三阳路过江隧道、南昌地铁越江隧道、杭州天目山路改造项目等多项工程均遭遇了严重的泥水盾构刀盘堵塞问题[2,4-5]. 其中，扬州瘦西湖隧道大直径泥水盾构全断面穿越黏土地层时，因黏土大量附着刀盘，迫使盾构长时间停机，带来重大安全隐患[6].

盾构刀盘堵塞现象的本质是黏性土与金属界面的黏结作用，相关研究最早起源于农业机械中土壤黏附触土部件的问题[7]. 学者们逐渐认识到水对土壤与金属界面黏附的显著影响[8-9]. 直至上世纪 90 年代，随着盾构隧道的广泛应用，黏性土与盾构触土部件的黏附问题日益突出，众多学者开展了大量研究，致力于揭示金属-土黏附机理及其影响规律. 现有研究以室内试验为主，主要从土体性质、金属表面特性以及荷载特征 3 个方面展开. 在土体性质方面，含水率[10-11]、矿物成分[12-14]、粒径[15-17]和固结度[18]等因素被证实对土-金属黏附行为具有重要影响，并可通过调控渣土含水率或掺入特定粒径的砂粒以缓解刀盘和刀具的黏粒附着. 在金属表面特性方面，材质和粗糙度是关键因素[19]. 近年来，界面仿生减黏技术也逐渐受到关注，文献[20]测试了不同波峰高度的金属波纹表面与土体的黏附力，发现波峰较低时更易附着黏粒. 此外，金属表面电渗效应[21-23]和温度变化[24-26]也被证实会显著影响黏附行为，其机制主要涉及界面水膜分布和表层土体含水率的改变. 在荷载特征方面，界面压力、接触时间与加载速率均会改变接触土体表面的颗粒排布形态和界面水膜分布[7,27]，因而也被视为影响黏附特性的重要因素.

然而，上述研究多基于土压平衡盾构的应用场景，未能充分考虑泥水盾构特有的泥浆环境对黏性土-金属黏附行为的影响. 在泥水盾构掘进过程中，渣土从刀盘刀具切削至管路排出全过程始终处于泥浆浸润状态，这将改变渣土表层的含水率与土颗粒结构排列，进而影响其黏附特性. 文献[28]开展了不同类型泥浆环境下的小尺度盾构刀盘旋转切削黏性土试验，以黏附于模型刀盘上的土体质量为评价指标，分析了泥浆对黏附行为的影响，结果表明泥浆黏度与土体黏附性呈正相关. 此后，作者通过泥水盾构掘进模型试验进一步发现，泥浆浓度也对黏性土的黏附性具有一定影响[29]. 可见，泥浆环境下的刀盘、刀具及相关设备与黏性土之间的黏附规律必然与土压平衡盾构存在差异. 然而，既有研究多基于模型刀盘，普适性有限，且缺乏对泥浆浸润影响黏附机理的深入探讨.

为明确泥浆浸润对黏性土-金属界面黏附力的影响规律，本文采用中心复合响应面试验设计方法，以膨润土质量分数、黏性土初始稠度指数、泥浆浸润时间作为 3 个影响因子，以黏性土与金属测盘间的黏附应力为响应值，开展泥浆浸润条件下的黏附力测试试验，建立各因素与黏附应力之间的数学关系，分析其影响规律及交互作用. 在此基础上，通过对比无泥浆浸润条件下的黏附力测试结果，进一步探讨泥浆浸润作用下土体黏附力的构成与作用机制.

## 1　试验材料与方法

### 1.1　试验材料

试验以钠基膨润土、高岭土和去离子水为原料制备人工土样. 其中，蒙脱石（钠基膨润土的主要矿物成分）与高岭土作为典型黏土矿物[30]，是引起盾构刀盘堵塞和泥饼形成的关键地质因素[31]. 试验所

用钠基膨润土(型号:AQUAGEL GOLD SEAL®)和高岭土(型号:ECKALITE-1)均购自无锡鼎隆矿业有限公司.图 1 为 2 种黏土粉末的 XRD 衍射图谱,表 1 和表 2 分别列出了其主要矿物组成.此外,采用激光粒度分析仪对 2 种黏土粉末进行了粒径测试,其粒径分布结果如图 2 所示.

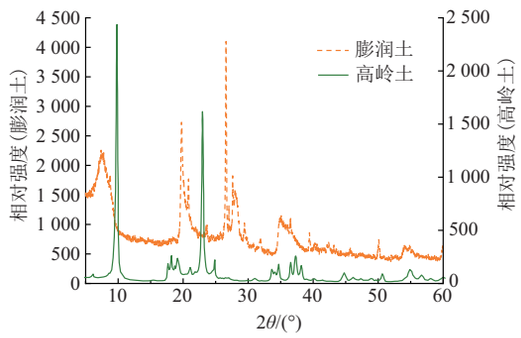



图 1 膨润土和高岭土 XRD 衍射图谱

Fig. 1 XRD diffraction patterns of bentonite and kaolin

**表 1 膨润土的矿物组成**

**Table 1 Mineral composition of the bentonite**

| 矿物组分 | 质量分数/% |
|---|---|
| 钠基蒙脱石 | 94.00 |
| 石英石 | 3.00 |
| 长石 | 2.00 |
| 云母 | 0.90 |
| 硫酸钙 | 0.06 |
| 方晶石 | 0.04 |

**表 2 高岭土的矿物组成**

**Table 2 Mineral composition of the kaolin**

| 矿物组分 | 质量分数/% |
|---|---|
| 高岭石 | 93.0 |
| 云母 | 2.0 |
| 石英 | 1.5 |
| 金红石 | 0.5 |
| 非晶质矿物 | 3.0 |

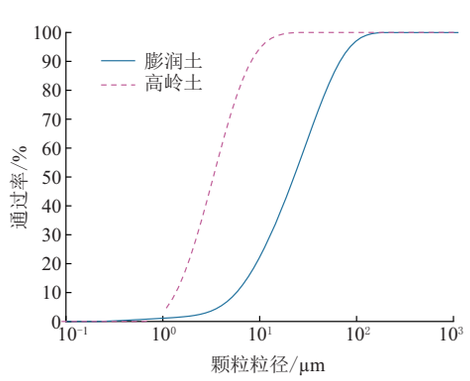



图 2 粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve

## 1.2 试验装置和方法

本文采用土样与金属测盘之间的法向黏附力测试值来表征黏性土的黏附特性.试验使用拉拔式黏附力测试装置(如图 3 所示),该装置主要由步进电机、黏附力传感器、压力传感器和金属测盘组成.步进电机用于控制金属测盘的竖向运动.金属测盘采用 6061-T6 铝合金制成,直径为 80 mm,测试表面粗糙度 $Ra$ 为 0.8 μm.通过连杆将电机与金属测盘相连,测盘上方安装有荷载传感器.装置采用活动凹槽连接机构,将一个量程较大的压力传感器与一个量程较小的压力传感器(用于测量土体与金属测盘间的黏附力,即拉力)串联布置.该设计使得金属测盘能够在测试过程中对土样施加较大的预压力,同时精确测量测盘与土样间相对较小的黏附力.

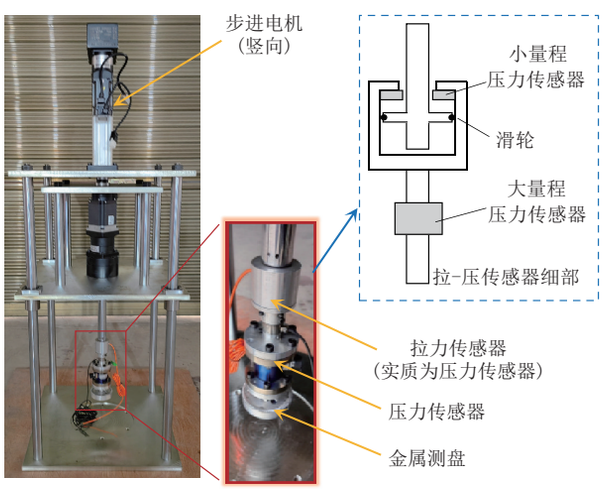



图 3 黏附力测试装置

Fig. 3 Testing device for adhesion force

试验流程主要包括土样与泥浆制备阶段和黏附力测试阶段,如图 4 所示.土样制备过程如下:首先将膨润土和高岭土粉末在干燥状态下均匀混合;随后按设计配比加入特定质量的去离子水,并进行二次搅拌;混合均匀后,用保鲜膜覆盖土样,静置 24 h;最后将土样逐层填入试样盒中,采用丝锯修平土样表面.泥浆制备过程为:将质量分数为 3% 的膨润土和 97% 的去离子水混合,搅拌均匀后静置 24 h.经测试,所用泥浆密度为 1.029 g/m$^3$,黏度为 5.4 Pa·s,苏式漏斗黏度为 17.9 s,pH 值为 8.65.黏附力测试阶段包括:将制备完成的膨润土泥浆倒入土样上方,按照试验设计静置特定时间进行浸润;通过步进电机控制测盘以 0.01 mm/s 的恒定速度下移,直至接触土样表面;随后将控制模式由位移控制切换为应力控制,设置压力增大

速率为 5 N/s；当预压力达到 50 N 时，持力 120 s；之后控制测盘以 0.05 mm/s 的速度向上运动．在整个过程中，计算机以 5 Hz 的采集频率记录测试时间、测盘位移及土-盘接触力．同一工况下的黏附力测试重复 2 次，2 次结果偏差不得超过 10%，最终取平均值作为测试结果．




图 4　试样制备和测试主要步骤

Fig. 4　Main steps of samples preparation and testing

### 1.3　黏附力测试曲线特征

图 5 展示了黏附力测试过程中测盘上方黏附力传感器所记录数值随时间变化的典型曲线．

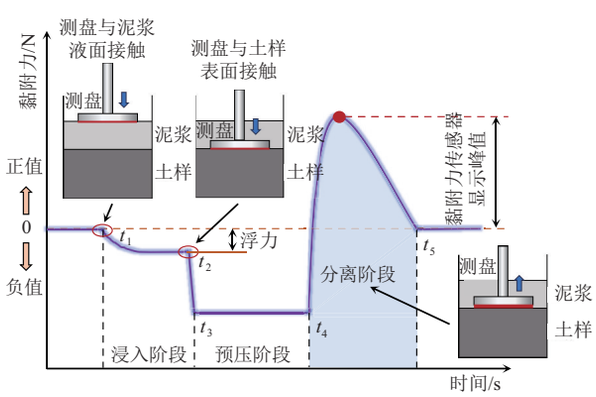



图 5　黏附力测试典型时程曲线

Fig. 5　Typical time curve of adhesion test

测试初始阶段，手动将黏附力传感器调零；至 $t_1$ 时刻，测盘接触泥浆液面，随着测盘逐渐浸入泥浆，受到向上的浮力作用，传感器数值逐渐下降；当测盘与土样表面接触时（$t_2$ 时刻），土样对测盘产生向上的托举力，传感器数值进一步快速降低；在 $t_2$～$t_3$ 阶段，测盘与土样间压力持续增大，直至达到设定预压力值，随后以伺服控制方式保持该压力 120 s；至 $t_4$ 时刻，测盘开始向上提升，逐渐与土样分离，最终在 $t_5$ 时刻完全分离．由于在 $t_4$～$t_5$ 的分离阶段，测盘始终处于泥浆环境且竖向位移很小，可认为其所受浮力与 $t_2$ 时刻相等．而测盘与土样的真实黏附力应为

$$F_{\mathrm{real}}=F_{\mathrm{peak}}-F_{\mathrm{buo}}, \tag{1}$$

式中：$F_{\mathrm{real}}$ 为测盘与土样的真实黏附力；$F_{\mathrm{peak}}$ 为黏附力传感器显示峰值（正值）；$F_{\mathrm{buo}}$ 为测盘受到浮力（负值）．

### 1.4　工况设计

由于黏附应力是反映黏性土与金属间黏附特性的直接指标．同时，考虑膨润土质量分数和初始稠度指数是决定黏性土基本物理力学性质（如吸水膨胀性、强度、塑性）的最核心指标．而泥浆浸润时间则与盾构停机时间、刀盘转动切削速率、排渣效率等泥水盾构施工参数密切相关，是后续在流固耦合仿真分析中表征盾构刀盘与黏性土间黏附应力变化的重要依据，同时泥浆浸润时间也能间接反映泥水盾构施工对金属-黏性土界面黏附力的影响．因此，本试验将黏附应力作为因变量，聚焦于膨润土质量分数、初始稠度指数和泥浆浸润时间 3 个因素对金属-黏性土间黏附应力的影响．

为了反映不同黏粒比例对地层黏附特性的影响，选取膨润土质量分数范围为 10%～90%．稠度指数是反映土体稠度状态的指标，可通过式（2）计算得到．

$$I_{\mathrm{c}}=(\omega_{\mathrm{L}}-\omega)/(\omega_{\mathrm{L}}-\omega_{\mathrm{p}}), \tag{2}$$

式中：$I_{\mathrm{c}}$ 为稠度指数；$\omega$ 为土体含水率；$\omega_{\mathrm{L}}$ 为土体液限含水率；$\omega_{\mathrm{P}}$ 为土体塑限含水率．

由式（2）可知，对于同一种土体（即土体液限和塑限含水率不变）而言，稠度指数由土体含水率决定．为了尽可能涵盖不同土体初始含水率状态，且尽可能降低因土样制备引起的试验误差，本研究将试验初始稠度指数范围设定为 0.1～0.9．浸润时间则对土体表层含水率影响显著，考虑管片拼装时盾构处于停机状态，开挖面土体较长时间处于泥浆浸润状态，上述时长一般为 60 min 左右[32]，因此设定试验中泥浆浸润时间范围为 10～60 min．

以三因素($X_1$, $X_2$, $X_3$)、五水平(−1.682, −1.000, 0.000, 1.000, 1.682)的中心组合设计(central composite design, CCD)来安排响应面黏附力测试试验工况[33]. 试验工况数量为$2^K+2K+M_0$,其中,$K$为自变量数;$M_0$为中心点试验数. 自变量$x_i$按下式进行编码变换:

$$X_i=(x_i-x_0)/\Delta x_i, \tag{3}$$

式中:$X_i$为自变量$x_i$的编码值;$x_0$为自变量在中心点的值;$\Delta x_i$为自变量变化步长. 用标准多项式回归方法,对数据进行拟合,便可得到一个二次多项式,该方程为描述响应值和自变量关系的回归模型.

回归模型可以描述为

$$Y=\beta_0+\sum\beta_iX_i+\sum\beta_{ii}X_i^2+\sum\beta_{ij}X_iX_j, \tag{4}$$

式中:$Y$为预测响应值;$\beta_0$为截距;$\beta_i$为线性系数;$\beta_{ii}$为平方系数;$\beta_{ij}$为交互作用系数.

三者对应的编码值分别为$X_1$, $X_2$, $X_3$. 因此,对于本次试验,$K$取值为3. 此外,根据文献[34],中心组合设计中心点上的重复试验可以对试验偏差起到评估作用,对于三因素试验,中心点试验数$M_0$取值为6组. 具体的中心组合设计自变量及其水平见表3.

**表3 中心组合设计自变量及其水平**

**Table 3 Independent variables and their levels for CCD**

| 变量 | 水平 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 最低 | 低 | 中心 | 高 | 最高 |
| 膨润土质量分数/% | 10 | 26 | 50 | 74 | 90 |
| 初始稠度指数 | 0.10 | 0.26 | 0.50 | 0.74 | 0.90 |
| 浸润时间/min | 10 | 20 | 35 | 50 | 60 |

根据膨润土和高岭土的不同配比,人工黏性土样可分为5种:A1, A2, A3, A4和A5,其特性指标如表4所示. 由表4可知,随着膨润土质量分数的增加,土样的渗透系数、阳离子交换量(CEC)和烧失量均逐渐降低;而塑性指数$I_p$和黏粒活性则随之增大.

**表4 土样特性指标**

**Table 4 Characteristic indicators of soil samples**

| 指标 | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 混合质量比 | | 10%B 90%K | 26%B 74%K | 50%B 50%K | 74%B 26%K | 90%B 10%K |
| 物理指标 | 渗透系数/(mm·min$^{-1}$) | 1.281 | 0.975 | 0.525 | 0.381 | 0.294 |
| | 中值粒径$d_{50}$/μm | B:0.46;K:3.30 | | | | |
| | 颗粒密度$\rho_G$/(g·cm$^{-3}$) | B:2.67;K:2.60 | | | | |
| 阿太堡界限 | 液限$w_L$/% | 88.20 | 129.55 | 195.24 | 261.02 | 282.50 |
| | 塑限$w_p$/% | 32.38 | 23.50 | 13.73 | 21.79 | 13.03 |
| | 塑性指数$I_p$ | 55.82 | 106.05 | 181.51 | 239.23 | 269.47 |
| 化学指标 | 阳离子交换量CEC/(cmol·kg$^{-1}$) | 45.90 | 43.80 | 40.60 | 27.24 | 18.30 |
| | 黏粒活性 | 0.60 | 1.14 | 1.94 | 2.57 | 2.89 |
| | 烧失量/(g·kg$^{-1}$) | 123.7 | 123.3 | 122.7 | 122.0 | 121.6 |

注:B表示膨润土,K表示高岭土;黏粒活性<0.75,表示不活跃;0.75<黏粒活性<1.25,表示正常;黏粒活性>1.25,表示活跃.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 二次多项模型建立

表5列出了试验工况及相应的黏附应力测试结果. 在不同试验工况下,黏性土样与测盘间的法向黏附应力变化范围为4.38~18.20 kPa.

基于黏附应力的测试结果,对各影响因素进行二次多项回归拟合. 采用$F$检验对方程各项进行显著性检验,设定显著性水平$\alpha=0.10$. 在回归分析中,若某项的$P$值小于$\alpha$,则认为该项对结果的影响显著;反之,则认为影响不显著,可在优化过程中予以剔除. 据此,剔除不显著项$X_1X_3$,获得调整后黏附应力对$X_1$, $X_2$, $X_3$三者的二次多项式回归方程为

$$\begin{aligned}Y_A=&0.02X_1+2.98X_2-2.14X_3+\\&1.65X_1X_2-0.69X_2X_3+1.49X_1^2+\\&2.01X_2^2+0.811\,5X_3^2+6.94,\end{aligned} \tag{5}$$

式中:$Y_A$为黏附应力响应值. 经计算,剔除不显著项后,回归方程的相关系数$R^2$为0.938 5,表明数学模型与实际情况拟合良好,可用该模型预测黏性土与金属的黏附应力. 由回归方程各项的方差分析表明,初始稠度指数和浸润时间对黏附应力的线性效应显著,$X_1X_2$, $X_2X_3$的交互作用显著.

**表 5　中心复合设计工况及黏附力测试结果**

**Table 5　CCD experimental design variables and results of adhesion test**

| 测试组序号 | 膨润土质量分数/% | 初始稠度指数 | 浸润时间/min | 黏附应力/kPa |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 26 | 0.26 | 20 | 10.04 |
| 2 | 74 | 0.26 | 20 | 7.68 |
| 3 | 26 | 0.74 | 20 | 15.25 |
| 4 | 74 | 0.74 | 20 | 18.20 |
| 5 | 26 | 0.26 | 50 | 8.88 |
| 6 | 74 | 0.26 | 50 | 5.26 |
| 7 | 26 | 0.74 | 50 | 10.04 |
| 8 | 74 | 0.74 | 50 | 14.31 |
| 9 | 10 | 0.50 | 35 | 11.52 |
| 10 | 90 | 0.50 | 35 | 10.96 |
| 11 | 50 | 0.10 | 35 | 8.29 |
| 12 | 50 | 0.90 | 35 | 17.10 |
| 13 | 50 | 0.50 | 10 | 14.24 |
| 14 | 50 | 0.50 | 60 | 4.38 |
| 15 | 50 | 0.50 | 35 | 6.43 |
| 16 | 50 | 0.50 | 35 | 6.98 |
| 17 | 50 | 0.50 | 35 | 6.06 |
| 18 | 50 | 0.50 | 35 | 7.25 |
| 19 | 50 | 0.50 | 35 | 8.07 |
| 20 | 50 | 0.50 | 35 | 6.85 |

## 2.2　单因子效应分析

采用降维法[35]对回归模型进行分析，将式(4)中的2个因子固定于0水平，得到特定条件下各因子的子回归模型．据此，分别绘制了$X_1$，$X_2$，$X_3$单因子变化下黏附应力响应预测值的变化趋势，如图6所示．从单因子对黏附应力响应值$Y_A$的影响幅度来看，在研究范围内，土样初始稠度指数的变化对黏附应力的影响最大，其变化范围为5.95～17.64 kPa；其次是浸润时间和膨润土质量分数，$Y_A$的变化范围分别为5.53～12.84 kPa和6.94～11.19 kPa．结果表明，泥水盾构在黏性地层中掘进时，刀盘与渣土之间的黏附行为对地层含水率最为敏感．因此，合理调节渣土含水率可有效减轻刀盘堵塞现象；此外，也应合理控制渣土在泥浆中的输运时间，即调节泥浆循环速率．

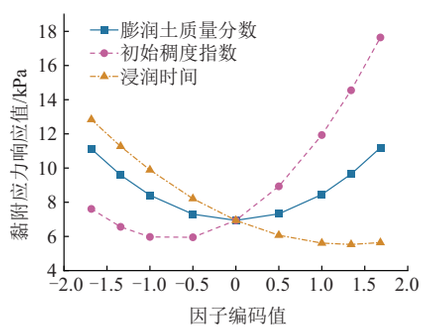
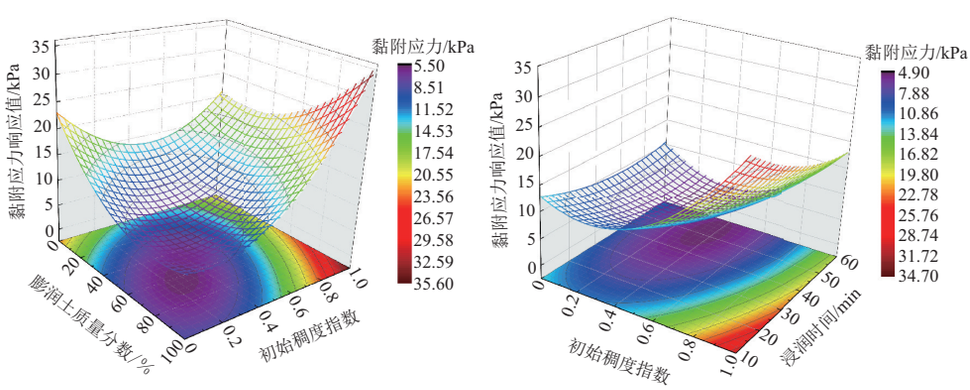



图6　单因子效应的黏附应力响应值曲线

Fig. 6　Curve of the adhesive stress response value under single factor effect

## 2.3　响应面交互作用分析

由前面分析，$X_1X_2$，$X_2X_3$的交互作用显著，因此在式(4)中分别将$X_3$和$X_1$固定于0水平，得到膨润土质量分数与初始稠度指数、初始稠度指数与浸润时间两者交互作用对黏附应力的响应面及等高线图，如图7所示．




(a) 膨润土质量分数与初始稠度指数　　(b) 初始稠度指数与浸润时间

图7　双因子交互作用三维曲面图与等高线图

Fig. 7　Three-dimensional surface plot and contour plot of the two-factor interaction

从图7a可以看出，膨润土质量分数和土样初始稠指数对黏附应力的影响曲面呈现四角高、中间低的悬网状．在泥浆浸润时间为35 min条件下，土样膨润土质量分数为64%，初始稠度指数为0.28时，黏附应力达到最小，为5.52 kPa；土样膨润土质量分数为100%，初始稠度指数为1.0时，黏附应力达到最大，为35.55 kPa．结合表4可知，膨润土质量分数越高，土样的塑性指数越大，即土体处于塑性状态的含水率范围越宽．因此，在相同泥浆浸润环境下，初始稠度指数越高的土样更难脱离塑性状态，其黏附性也相应增强．从图7b可以看出，在土样初始稠度指数相同的条件下，黏性土与金属间的

黏附应力随浸润时间的增加而降低;并且初始稠度指数越小,黏附应力随浸润时间增加的下降速率也越缓.黏附应力的最大值出现在初始稠度指数为1.0、泥浆浸润时间为10 min时.由此可知,当泥水盾构在含水率较低的黏性地层中掘进时,若刀盘掘削速度较快,更容易导致渣土黏附现象的发生.

### 2.4 基于黏附应力的堵塞风险评估

为明确泥水盾构在黏性地层中的掘进风险,需将试验测得的黏附应力与刀盘堵塞风险建立直接联系.借鉴文献[36]提出的基于法向黏附应力的堵塞潜力评估方法,绘制了20组工况下黏附应力与堵塞风险的对应关系,如图8所示.

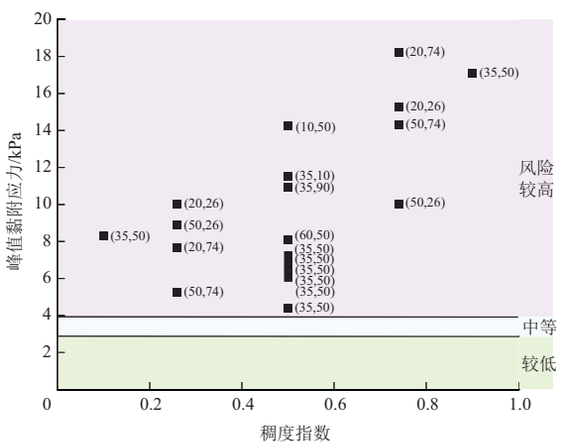



图8 基于法向应力的堵塞风险评估图

Fig. 8 Normal stress-based clogging risk assessment chart

图中数据点右侧括号中的数字分别表示泥浆浸润时间(单位:min)和膨润土质量分数(单位:%).由图8可知,泥浆浸润作用下各工况土体对盾构刀盘的堵塞风险均较高,但总体而言,初始稠度指数越高,其引起刀盘堵塞(法向黏附应力)的风险也越高,这与实际工程中低含水率黏土地层更易形成泥饼的现象高度吻合.

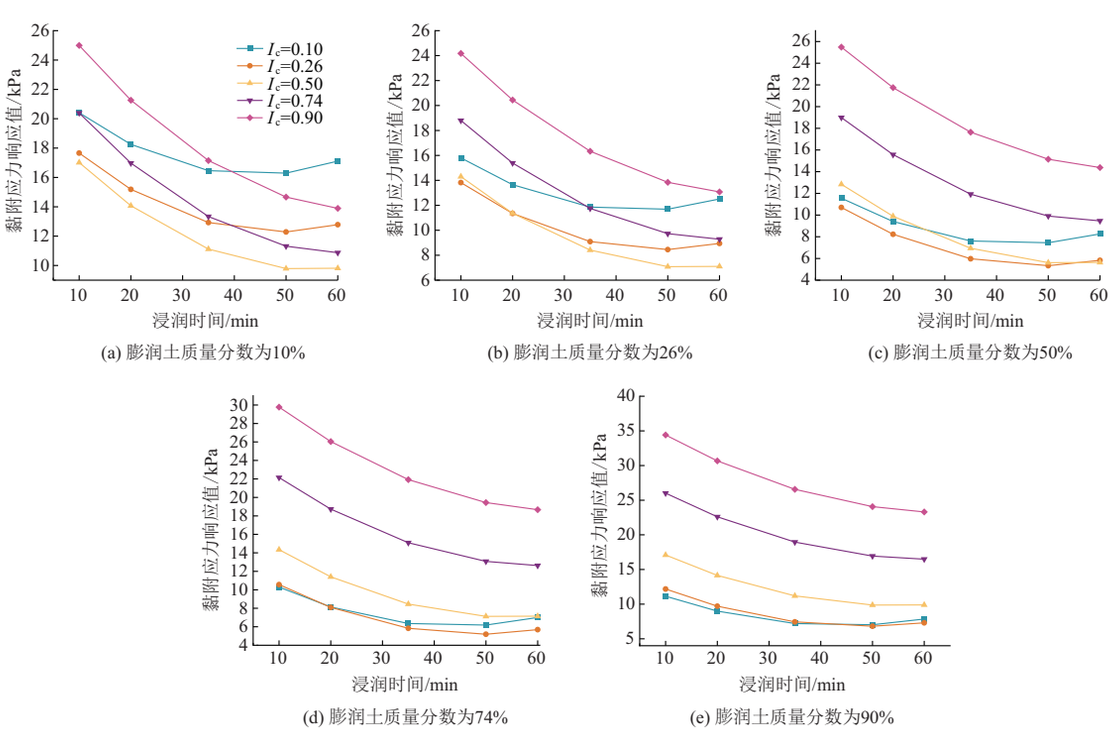
此外,当初始稠度指数较低或泥浆浸润时间充分(浸润时间>50 min)时,黏附应力显著降低,表明通过优化掘进参数(如调整泥浆循环速率以延长渣土浸润时间)可有效降低刀盘堵塞风险.

## 3 泥浆浸润对黏附性的作用

为了进一步明确泥浆浸润环境对盾构刀盘与黏土间黏附行为的影响,对泥浆浸润时间以及有无泥浆浸润作用下的黏附应力变化规律进行探讨.

### 3.1 泥浆浸润时间

图9展示了根据式(4)计算得到的土样与测盘黏附应力峰值随泥浆浸润时间的变化规律.可以看到,在不同稠度指数条件下,土样的黏附应力峰值均随泥浆浸润时间的延长而逐渐减小.在泥浆浸润初期(10 min时),初始稠度指数$I_c$为0.90的土样黏附应力峰值最大;而最小黏附应力峰值则由于膨润土质量分数的不同而有所差异.




(a) 膨润土质量分数为10%　(b) 膨润土质量分数为26%　(c) 膨润土质量分数为50%

(d) 膨润土质量分数为74%　(e) 膨润土质量分数为90%

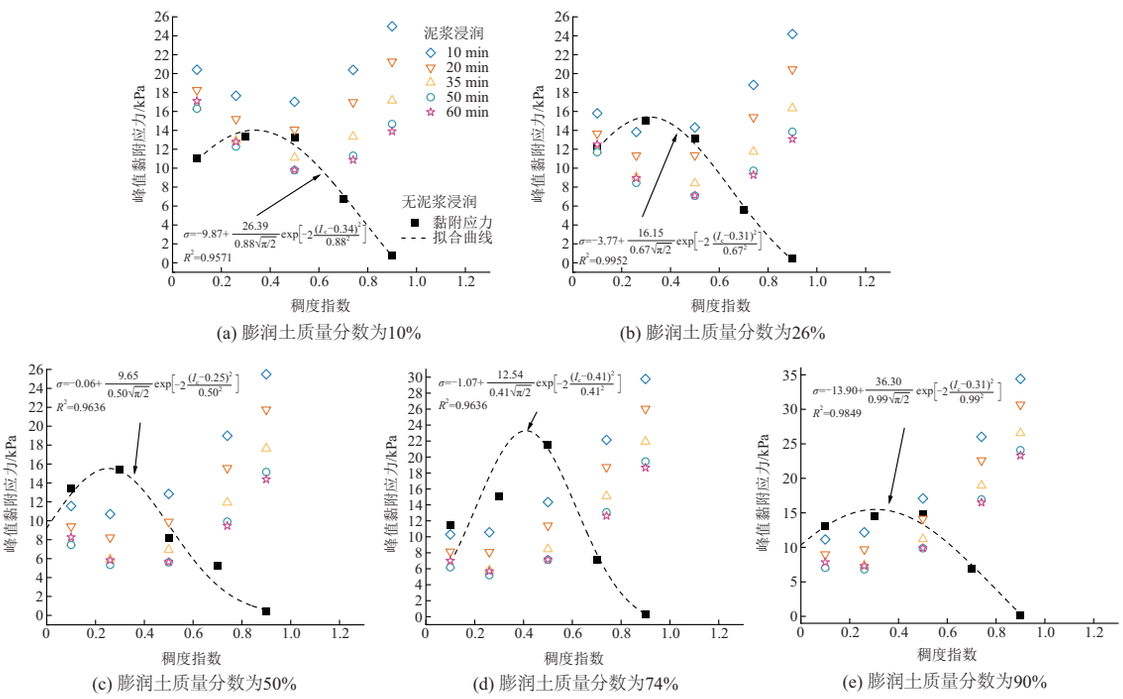
图9 黏附应力峰值与泥浆浸润时间的关系

Fig. 9 The relationship between peak adhesive stress and immersion time of slurry

随着泥浆浸润时间延长，土样表层持续吸水，含水率逐渐升高．当泥浆浸润时间达到60 min时，对于膨润土质量分数为26%，50%，74% 和90%的土样，初始稠度指数$I_c$为0.90的土样仍表现出最大黏附应力峰值；而膨润土质量分数为10%的土样，其最大黏附应力峰值则出现在$I_c$为0.10的条件下．因此，在泥水盾构掘进过程中，一般而言，含水率较低的黏性地层更容易引起刀盘及其他设备的堵塞和结饼；然而，在刀盘开挖和泥浆循环速度较慢的施工条件下，盾构刀盘更易受困于初始含水率和高岭土含量均较高的黏性地层．

### 3.2　泥浆浸润和无泥浆浸润

图10a～10e分别为膨润土质量分数为10%，26%，50%，74% 和90%的土样在有无泥浆浸润条件下，峰值黏附应力随土样初始稠度指数的变化规律．



(a) 膨润土质量分数为10%　(b) 膨润土质量分数为26%

(c) 膨润土质量分数为50%　(d) 膨润土质量分数为74%　(e) 膨润土质量分数为90%

图10　峰值黏附应力与初始稠度指数的关系

Fig. 10　The relationship between peak adhesive stress and initial consistency index

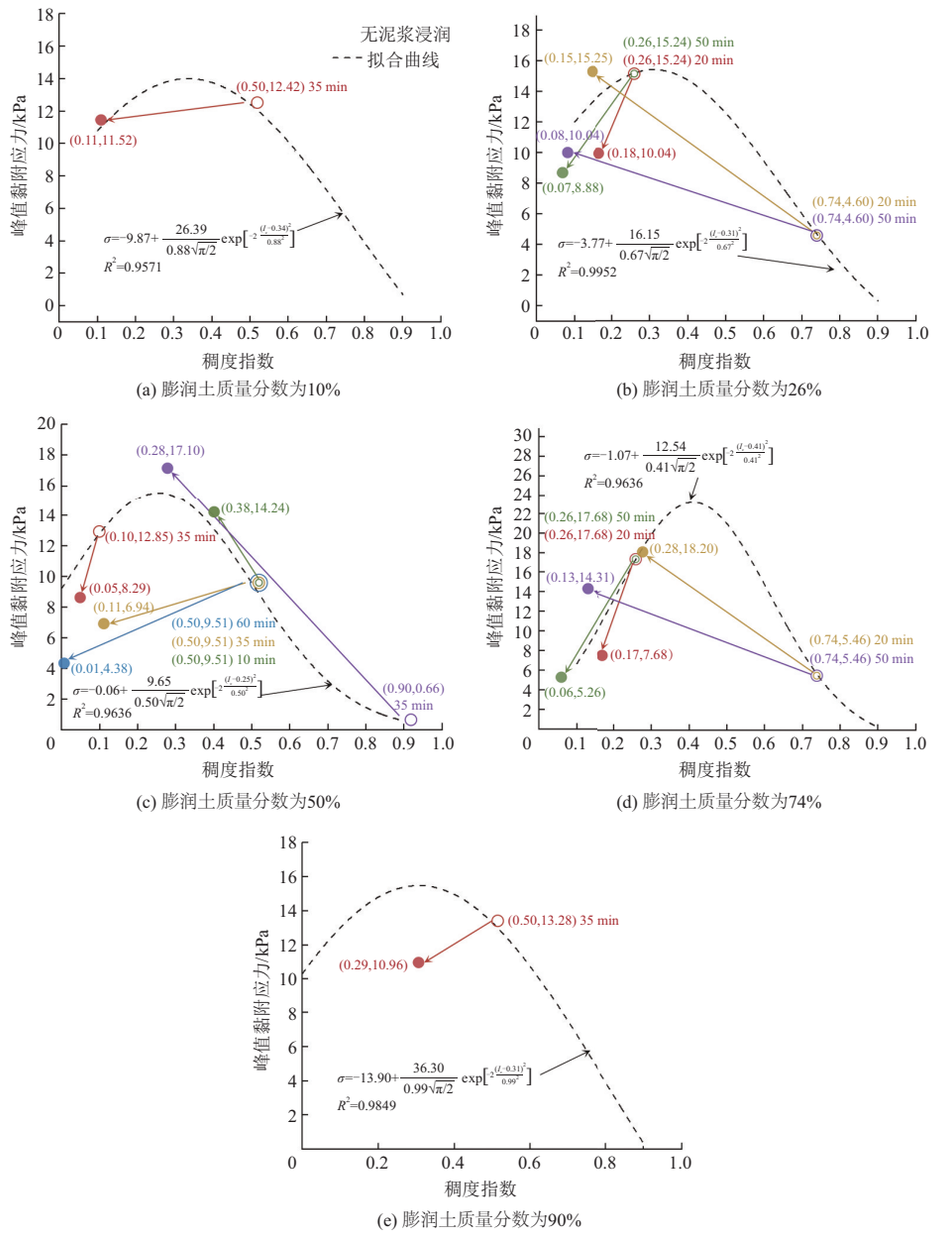
图10中黑点表示无泥浆浸润时，不同初始稠度指数的土样与测盘之间的黏附应力峰值．可以发现，黏附应力峰值随着土样初始稠度指数的增加先增大后减小，该变化规律与已有诸多研究结果一致[37-39]．由此可知，在初始稠度指数为0.1～0.9范围内，土-金属黏附应力峰值必然存在最大值；以此最大值为界，当稠度指数低于该临界值时，峰值黏附应力与稠度指数呈正相关；超过该值时，则呈负相关．

图10中彩色点表示泥浆浸润条件下，通过响应面计算得到的各初始稠度指数土样与测盘间的峰值黏附应力，不同颜色代表不同泥浆浸润时间下的测试值．结果显示，在同一浸润时间下，峰值黏附应力随土体初始稠度指数的增加总体呈现先减小后增大的趋势，与无泥浆浸润条件下的变化规律相反．由此可见，由于泥浆浸润环境显著改变了黏附行为的作用机制，导致泥水盾构刀盘与黏性渣土之间的黏附规律与土压平衡盾构存在明显差异．

对泥水盾构而言，可在不同黏性地层中确定对应于最小黏附应力的最优含水率，采取针对性的刀盘减黏防堵措施．此外，通过对比图10中相同初始稠度指数下有、无泥浆浸润作用的峰值黏附应力．可以发现，在初始稠度指数为0.74和0.90时，泥浆浸润作用下土样与测盘间的峰值黏附应力，显著高于无泥浆条件下的最大值．根据文献[10]的研究表明，黏性土与金属界面间的黏附力主要源于界面液膜的毛细作用，液膜越薄，黏附力越大．对于稠度指数较高的土样而言，其吸水速率相对更快，使得黏性土与金属间的液膜在初期较薄，而随着泥浆中的水分持续渗入，土样表面液膜逐渐增厚，黏附应力也相应变小．图10中泥浆浸润作用下的黏附应力测试数据也较好印证了上述解释．

为验证上述推测并定量分析土样表层含水率

的变化，在黏附力测试后对表层土样进行了取样，经称重、烘干及再次称重，计算得到试样表层含水率及实际稠度指数．图 11 为泥浆浸润后黏性土样表层实际稠度指数与黏附力的变化规律．




(a) 膨润土质量分数为10%　(b) 膨润土质量分数为26%

(c) 膨润土质量分数为50%　(d) 膨润土质量分数为74%

(e) 膨润土质量分数为90%

图 11　泥浆浸润作用下稠度指数与黏附力变化

Fig. 11　Changes in consistency index and adhesion under slurry immersion

从图 11 中可以看到，当土样的初始稠度指数较高（含水率较低）时，在泥浆浸润的前 20 min 内，表层吸水速率较快，之后急剧减缓．因此，尽管土样初始稠度较高（含水率较低），经短时间泥浆浸润后，其表层土体实际含水率迅速上升，黏附应力也随之增大，导致其值显著高于无泥浆浸润条件下的黏附应力．

土样与测盘间的黏附应力总体变化趋势，与无泥浆浸润条件下黏附力随稠度指数的变化规律相符．然而，从图 11 中也能够观察到，在相同实际稠度指数下，多数泥浆浸润条件下的黏附应力仍显著区别于无泥浆浸润条件下的数值．这表明，泥浆浸润环境中黏性土与金属界面的黏附力并非仅由土样表层含水率所决定．

泥浆的存在还可能增强界面处的“吸盘效应”（如图 12 所示），即在分离过程中由于泥浆未能及时填充分离间隙，形成局部负压[40]，进一步增大表观黏附力．这一机制与文献[10]所述的“动态水膜回流”过程类似，尤其在黏性土与金属界面低速分离过程中尤为显著．

此外，当金属测盘与土样表面接近时，有部分泥浆残留于界面之间，其表面张力和流动特性与纯水存在较大差异，使得黏性土表面液膜（含泥浆）引起的黏附应力也相应改变.

但如何定量分析黏性土表层对金属界面的“吸盘效应”以及泥浆浸润环境下界面“泥膜”的张拉作用，及其在泥浆浸润作用下对黏附应力的贡献，有待进一步研究.

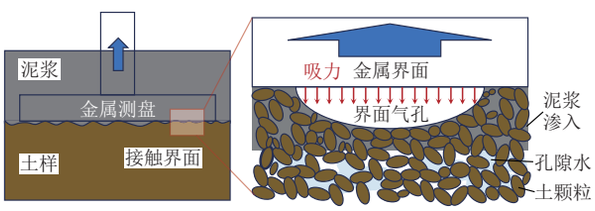



图 12　黏性土-金属接触界面“吸盘效应”示意

Fig. 12　Suction effect diagram of the interface between cohesive soil and metal

## 4　结　论

1）所构建的二次多项式回归模型能够有效预测泥浆浸润作用下的黏性土与金属界面黏附应力. 初始稠度指数对黏附应力的影响最为显著，且膨润土质量分数与初始稠度指数、初始稠度指数与浸润时间之间存在较为显著的交互效应.

2）在泥浆浸润条件下，含水率较低的黏性地层更易导致盾构刀盘及其他设备堵塞和结饼；但初始含水率较低，且膨润土含量较高的黏性地层，其黏附性在泥浆中的下降速率更快.

3）随着初始稠度指数增大，泥浆浸润作用下的土样与金属测盘间的峰值黏附应力，先减小后增大，且可能超过无泥浆条件下的最大值，表明该环境下黏附行为不仅仅取决于土样的含水率.

需要指出，本文仅从膨润土质量分数、初始稠度指数以及泥浆浸润时间 3 个因素分析了法向黏附应力的变化规律，实际黏性土与金属间黏附特性的影响因素众多. 此外，正如文献[38]与文献[10]研究表明，盾构刀盘的实际工作状态更受切向黏附行为的控制，而本研究尚未涉及此内容. 因此，未来研究将在此基础上进一步拓展：一方面，将探究不同泥浆特性（如黏度、密度）、土体组分（如其他黏土矿物）等因素对法向与切向黏附应力的共同作用规律；另一方面，将重点攻关泥浆浸润作用下黏性土-金属界面的切向黏附特性，并定量化研究“吸盘效应”等在法向与切向分离过程中对黏附应力的贡献机制，以期最终构建一个综合性的黏附潜力评估模型.

**参考文献：**

[1] 陈湘生，徐志豪，包小华，等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报，2020，33(12)：1-14.
CHEN Xiangsheng，XU Zhihao，BAO Xiaohua，et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. China Journal of Highway and Transport，2020，33(12)：1-14.

[2] 钱七虎，陈　健. 大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J]. 隧道建设（中英文），2021，41(2)：157-164.
QIAN Qihu，CHEN Jian. Analysis of tunneling risks of large-diameter shield and thoughts on its challenges[J]. Tunnel Construction，2021，41(2)：157-164.

[3] 刘德军，乔可可，商　奇，等. 复合地层大直径盾构隧道侧穿既有桩基扰动影响研究[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(6)：1144-1156.
LIU Dejun，QIAO Keke，SHANG Qi，et al. Research on the disturbance effects of large-diameter shield tunneling side-crossing on existing pile foundations in composite strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(6)：1144-1156.

[4] 周文波，吴惠明，赵　峻. 泥岩地层常压刀盘盾构的掘进策略与分析[J]. 现代隧道技术，2019，56(4)：8-15.
ZHOU Wenbo，WU Huiming，ZHAO Jun. On driving strategy of the shield machine with atmospheric cutterhead in mudstone strata[J]. Modern Tunnelling Technology，2019，56(4)：8-15.

[5] 王明胜. 南昌地铁泥水盾构穿越赣江浅覆盖透水层施工关键技术研究[J]. 隧道建设，2015，35(11)：1222-1228.
WANG Mingsheng. Key technologies for slurry shield crossing underneath Ganjiang River with shallow permeable cover：Case study on line 1 of Nanchang Metro[J]. Tunnel Construction，2015，35(11)：1222-1228.

[6] 戴洪伟. 全断面黏土地层泥水盾构改造及高效环流出渣技术研究[J]. 铁道标准设计，2015，59(10)：103-108.
DAI Hongwei. Research on slurry TBM modification and high efficiency circulating slag in whole section of clay stratum[J]. Railway Standard Design，2015，59(10)：103-108.

[7] SASS I，BURBAUM U. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2009，68：27-34.

[8] FOUNTAINE E R. Investigations into the mechanism

of soil adhesion[J].European Journal of Soil Science, 1954:5(2):251-263.

[9] JIA X.Theoretical analysis of the adhesion force of soil to solid materials[J].Biosystems Engineering,2004,87(4):489-493.

[10] BURBAUM U,SASS I.Physics of adhesion of soils to solid surfaces[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2017,76(3):1097-1105.

[11] BARZEGARI G,TIRKHOONI M,KHABBAZI A.Experimental assessment of clayey layers for clogging of TBM in Tabriz subway lines,Iran[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2020,105:103560.

[12] KANG C,WU Y C,YI Y L,et al.Assessment of the clogging potential of two clays[J].Applied Clay Science,2019,178:105134.

[13] CHESHOMI A,JAFARI M,RAJABI A M.Results of cone and piston pull-out tests for evaluation of clay-soil adhesion[J].Soil and Tillage Research,2023,225:105552.

[14] BASMENJ A K,MIRJAVAN A,GHAFOORI M,et al.Assessment of the adhesion potential of kaolinite and montmorillonite using a pull-out test device[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2017,76:1507-1519.

[15] WANG S Y,ZHOU Z H,LIU P F,et al.On the critical particle size of soil with clogging potential in shield tunneling[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2023,15(2):477-485.

[16] 周志伟,郑文杰,白雪冬,等.黄土黏附特性评价-室内试验和微观响应机制研究[J].土木工程学报,2024,57(6):209-220.
ZHOU Zhiwei,ZHENG Wenjie,BAI Xuedong,et al.Evaluation of loess adhesion characteristics-laboratory experiment and inherent microscopic mechanism[J].China Civil Engineering Journal,2024,57(6):209-220.

[17] 马运庆,秦 宽,张永政,等.基于土粒与含水率变化规律的触土部件黏附特性研究[J].华中农业大学学报,2024,43(1):258-266.
MA Yunqing,QIN Kuan,ZHANG Yongzheng,et al.Adhesion characteristics of soil-touching components based on changing law of particle and moisture of soil[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2024,43(1):258-266.

[18] KOOISTRA A,VERHOEF P N W,BROERE W,et al.Appraisal of stickiness of natural clays from laboratory tests[C]//The 25th National Symposium of Engineering Geology,Netherlands,1999.

[19] ZIMNIK A R,BAALEN L R,VERHOEF P N W,et al.The adherence of clay to steel surfaces[C]//ISRM International Symposium,Delft,2000.

[20] 刘 成,黄 琳,肖宇豪,等.土体含水率和金属波纹状表面对界面黏附力影响[J].林业工程学报,2021,6(3):161-165.
LIU Cheng,HUANG Lin,XIAO Yuhao,et al.Experimental study on the influence of soil moisture content and metal corrugated surface on the interfacial adhesion[J].Journal of Forestry Engineering,2021,6(3):161-165.

[21] SPAGNOLI G,STANJEK H,FEINENDEGEN M.Electrical manipulation of the clogging properties of Ypresian and Boom clays[J].Environmental and Engineering Geoscience,2014,20(1):99-108.

[22] 肖宇豪,刘 成,黄 琳,等.电渗法降低黏性土黏附力室内试验[J].林业工程学报,2020,5(4):168-173.
XIAO Yuhao,LIU Cheng,HUANG Lin,et al.Laboratory tests on adhesion reduction of clay soil by electro-osmosis method[J].Journal of Forestry Engineering,2020,5(4):168-173.

[23] 万泽恩,尹威方,李树忱,等.电渗透法降低黏土-金属界面黏附力的机理与试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(8):1732-1741.
WAN Zeen,YIN Weifang,LI Shuchen,et al.Mechanism and experimental tests on reducing adhesive force of clay-metal interface by using electro-osmosis method[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(8):1732-1741.

[24] YING K C,PAN X M,LIAN M Q,et al.Effect of soil-cutterhead interface temperature on the consolidation and hardening of mud cake under multi-factor conditions[J].Arabian Journal for Science and Engineering,2023,48:1-13.

[25] 杨 益,谭 超,李兴高.考虑温度效应的盾构法黏土-金属界面黏附力试验[J].土木工程与管理学报,2022,39(2):120-125.
YANG Yi,TAN Chao,LI Xinggao.Experimental on tangential adhesion of the contact surface between clay and shield cutter head considering effect of temperature[J].Journal of Civil Engineering and Management,2022,39(2):120-125.

[26] 王修伟,李树忱,刘祥坤,等.考虑温度效应的盾构刀盘黏附试验及堵塞防治[J].岩土力学,2024,45(8):2299-2310.
WANG Xiuwei,LI Shuchen,LIU Xiangkun,et al.Adhesion test and blockage prevention of shield tunneling cutterhead considering temperature effect[J].

Rock and Soil Mechanics,2024,45(8):2299-2310.

[27] 刘　琦,漆采玲,马雯波,等.深海底质土-金属界面间黏附特性试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):701-708.
LIU Qi,QI Cailing,MA Wenbo,et al.Experimental study of adhesion between deep-sea sediment and metal surface[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(2):701-708.

[28] ZUMSTEG R,PUZRIN A M,ANAGNOSTOU G.Effects of slurry on stickiness of excavated clays and clogging of equipment in fluid supported excavations[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2016,58:197-208.

[29] 袁大军,毛家骅,王　将,等.软岩地层泥水盾构掘进刀盘堵塞现象研究[J].中国公路学报,2022,35(4):177-185.
YUAN Dajun,MAO Jiahua,WANG Jiang,et al.Study on clogging phenomenon on cutterhead of slurry shield machine tunneling under soft rock[J].China Journal of Highway and Transport,2022,35(4):177-185.

[30] 周克强,夏　令,宋少先,等.蒙脱石驱动的半干旱荒漠化矿区藻结皮快速形成及机制[J].中国矿业大学学报,2023,52(3):607-614.
ZHOU Keqiang,XIA Ling,SONG Shaoxian,et al.Rapid establishment and mechanism exploration of algae crust based on montmorillonite in semi-arid mining area with desertification[J].Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(3):607-614.

[31] OLIVEIRA D G G D,THEWES M,DIEDERICHS M S.Clogging and flow assessment of cohesive soils for EPB tunnelling:Proposed laboratory tests for soil characterisation[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2019,94:103110.

[32] 贾连辉,李太运.超大直径盾构管片拼装机关键技术[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(4):816-823.
JIA Lianhui,LI Taiyun.Key technologies of segment erector for super-large shield machine[J].Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2020,54(4):816-823.

[33] 畅　帅,徐日庆,李雪刚,等.基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J].岩土力学,2014,35(1):105-110.
CHANG Shuai,XU Riqing,LI Xuegang,et al.Optimization of formula for stabilizing muddy soil using response surface methodology[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(1):105-110.

[34] ASLAN N.Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration[J].Powder Technology,2008,185(1):80-86.

[35] 徐　伟.鱿鱼加工废弃物低盐鱼酱油速酿工艺及生化特性研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.
XU Wei.Study on the accelerated fermentation technology and biochemistry characters of low salt fish sauce from squid processing wastes[D].Qingdao:Ocean University of China,2008.

[36] FANG Y,CHEN Z T,SONG T T,et al.New clogging potential assessment method for conditioned soil based on modified pullout and direct shear tests[J].Acta Geotechnica,2023,18:3307-3322.

[37] 方　勇,王宇博,王　凯,等.基于界面黏附力盾构堵塞风险评判方法研究[J].岩土工程学报,2023,45(9):1813-1821.
FANG Yong,WANG Yubo,WANG Kai,et al.Risk evaluation method for shield clogging based on interface adhesion force[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(9):1813-1821.

[38] 尹义豪,钟小春,何子良,等.考虑压力、温度效应的黏性土黏附强度变化规律研究[J].现代隧道技术,2024,61(3):175-183.
YIN Yihao,ZHONG Xiaochun,HE Ziliang,et al.Study on variation regularity of adhesion strength of cohesive soil considering pressure and temperature effects[J].Modern Tunnelling Technology,2024,61(3):175-183.

[39] WANG G,ZHANG X W,LIU X Y,et al.Experimental assessment of clayey layers for clogging potential in TBM tunnel driving and the influence of compositional factors[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2023,137:105113.

[40] 邱长林,张庆建,闫澍旺,等.黏土黏附力试验研究[J].岩土力学,2017,38(5):1267-1272.
QIU Changlin,ZHANG Qingjian,Yan Shuwang,et al.Experimental study of adhesion of clay[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(5):1267-1272.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）