

DOI: 10.11779/CJGE2021S2012

顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究

雷华阳^{1,2,3}, 刘旭¹, 施福硕¹, 许英刚¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350;
3. 天津大学中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350)

摘要: 聚合物改性膨润土泥浆具有良好的流变性和触变性, 能充分发挥其在顶管施工过程中润滑和支撑的作用, 进而有效提高工程的施工效率, 并得到了广泛应用。针对不同的施工环境和地质条件, 目前难以形成统一的泥浆配比方案。基于工程中对泥浆特性的基本要求, 在合适的漏斗黏度和滤失量取值范围内, 探究了羧甲基纤维素钠(CMC)、聚丙烯酰胺(PAM)和瓜尔胶3种聚合物在不同膨润土和纯碱用量下对泥浆工程特性的影响, 提出了相应指标的预测计算公式, 并进行了关联性分析, 可为工程应用中泥浆的制备提供参考。

关键词: 聚合物; 膨润土泥浆; 漏斗黏度; 滤失量

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0051-05

作者简介: 雷华阳(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: leihuayang74@163.com。

Proportional optimization of polymer-modified bentonite slurry in pipe jacking

LEI Hua-yang^{1, 2, 3}, LIU Xu¹, SHI Fu-shuo¹, XU Ying-gang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The polymer-modified bentonite slurry has good rheological and thixotropic properties, which can adequately perform its functions of lubrication and support in pipe jacking construction. Therefore, it is widely used in construction due to its high efficiency. For different construction environments and geological conditions, it is difficult to form a unified slurry proportioning. Based on the requirements of slurry characteristics, the effects of sodium carboxymethyl cellulose(CMC), polyacrylamide(PAM) and guar gum on slurry characteristics are investigated. Within the suitable range of funnel viscosity and filtration loss, the prediction formula is proposed, and the correlation analysis is conducted, which can provide a reference for the preparation of slurry proportioning in engineering applications.

Key words: polymer; bentonite slurry; funnel viscosity; filtration

0 引言

膨润土是一种以蒙脱石为主要矿物成分的层状硅铝酸盐矿物, 遇水膨胀, 具有良好的吸附性和造浆性, 被广泛应用于软土地基处理及建设工程当中^[1-3]。膨润土泥浆主要可分为钠基膨润土泥浆和钙基膨润土泥浆, 膨润土泥浆中的钠离子的离子交换能力远高于钙离子^[4], 钠基膨润土泥浆具有更高的吸附性、触变性和胶凝性, 更适用于工程的应用。

在顶管工程当中, 管体侧壁与土体之间会生成较大的摩阻力, 故需要注浆以降低管壁侧摩阻力, 提高施工效率^[5-7]。膨润土泥浆经搅拌后形成悬浮液, 当浆液注入土层中的超挖间隙, 其是具有黏性和流动性的胶体, 使得管体侧壁的摩擦转化为湿摩擦^[8]; 当渗入土层的浆

液不再运动时, 浆液又会发生絮凝, 形成凝胶体, 起到支撑作用^[9]。由于膨润土泥浆的流变性和触变性, 能充分发挥其在顶管施工过程中润滑和支撑的作用。顶管施工过程中膨润土泥浆注入土层后, 先与周围土体发生渗透形成稳定的泥浆套后, 再填补管体与土体之间的空隙。滤失量通常作为一项重要指标反映浆体形成泥饼形成的质量, 滤失量越大则泥饼越厚且疏松, 滤失量越小则泥饼的形态越薄且致密。低滤失量的泥浆在顶管工程中所形成的泥浆套不透水性更好, 结构致密强度高, 能够有效阻止地下水的侵入和泥浆的失水和渗透作用。泥

浆良好的流动性有利于泥浆的泵送和流动，能够有效降低管壁的摩阻力，提高施工效率。漏斗黏度作为一项简单易测的指标，虽然不能反映泥浆的流变特性，但可反映泥浆的流动性，通常在施工现场作为一种便捷的泥浆控制指标。

膨润土泥浆通常是由膨润土、水和添加剂按一定比例配置而成的，顶管施工中的膨润土泥浆通常选用纯碱和聚合物组合的方式来提高浆液的性能^[10,11]。本文探究了羧甲基纤维素钠（CMC），聚丙烯酰胺（PAM）和瓜尔胶三种聚合物在不同膨润土和纯碱用量下对泥浆工程特性的影响，并提出了相应的预测公式，在此基础之上进行关联度分析，为工程应用中泥浆的制备提供参考。

1 聚合物改性膨润土泥浆的制备

膨润土中的主要矿物成分为蒙脱石，蒙脱石的微观结构是由中间夹有一层铝氧八面体，上下两层各为硅氧四面体组成的三片状结构，属于典型的2:1型单斜晶细结构，具有较高的离子交换能力、吸附能力^[4,12]。本文所选用膨润土的主要矿物成分：高岭石为0.2%，伊利石为16.1%，绿泥石为0.4%，蒙脱石含量达到83.3%。

顶管工程中膨润土改性泥浆中的添加剂主要分为两类，一类为纯碱，能增强泥浆中离子交换作用，使得晶体结构带负电产生斥力，增强膨润土的分散效应，提高悬浮性；另一类为聚合物，能通过其自身的分子链吸附在膨润土晶体结构的表面，进而形成立体网状结构，提高泥浆工程特性。试验分别设置纯膨润土泥浆（A组）、纯碱膨润土泥浆（B组）、纯碱CMC膨润土泥浆（C组）、纯碱PAM膨润土泥浆（D组）和纯碱瓜尔胶膨润土泥浆（E组）进行对比分析研究，具体组别参见表1~5。其中，水的用量各组试验均选用1000 g的水进行泥浆的配置，纯碱的用量使泥浆中的纯碱浓度分别为0.4, 0.8 mol/L。

表1 纯膨润土泥浆试验分组

Table 1 Grouping of bentonite slurry

组别	水/g	纯碱/(mol·L ⁻¹)	膨润土/g
A1			50
A2	1000	0	75
A3			100
A4			150

表2 纯碱膨润土泥浆试验分组

Table 2 Grouping of bentonite slurry with sodium carbonate

组别	水/g	纯碱/(mol·L ⁻¹)	膨润土/g
B1			50
B2		0.4	75
B3			100
B4	1000		150
B5			50
B6		0.8	75
B7			100
B8			75

表3 纯碱CMC膨润土泥浆试验分组

Table 3 Grouping of bentonite slurry with sodium carbonate and CMC

组别	水/g	膨润土/g	纯碱/(mol·L ⁻¹)	CMC/g
C1				2
C2		50	0.4	3
C3				4
C4				5
C5				1
C6	1000	75	0.8	2
C7				3
C8				4
C9				1
C10		100	0.8	2
C11				3
C12				4

表4 纯碱PAM膨润土泥浆试验分组

Table 4 Grouping of bentonite slurry with sodium carbonate and PAM

组别	水/g	膨润土/g	纯碱/(mol·L ⁻¹)	PAM/g
D1				1
D2		50	0.4	1.5
D3				2
D4				1
D5	1000	75	0.8	1.5
D6				2
D7				1
D8		100	0.8	1.5
D9				2

表5 纯碱瓜尔胶膨润土泥浆试验分组

Table 5 Grouping of bentonite slurry with sodium carbonate and guar gum

组别	水/g	膨润土/g	纯碱/(mol·L ⁻¹)	瓜尔胶/g
E1				0.2
E2		75	0.4	0.3
E3				0.4
E4				0.1
E5	1000	100	0.4	0.2
E6				0.3
E7				0.1
E8		150	0.8	0.2
E9				0.3

在相同室温（20℃）、搅拌速率（1000 r/min）和搅拌时间（1 h）条件下，泥浆配置完成后静置30 min，再进行漏斗黏度和滤失量的测试。漏斗黏度采用漏斗黏度计进行测量，将700 mL浆液放入锥形漏斗当中，记录其流出500 mL泥浆所需的时间，即为漏斗黏度，通常建议取值范围为25~45 s^[8]。滤失量可由中压滤失仪进行测量，在0.69 MPa的压力下，记录30 min通过滤失仪所渗出的液体量，即为滤失量，通常滤失量不宜超过25 mL^[13]。

2 泥浆的配比优化分析

由于现场施工条件复杂，目前难以形成统一的泥浆配比方案。基于实际工程对泥浆特性的基本要求，开展

表 6 纯碱膨润土泥浆试验结果

Table 6 Results of bentonite slurry with sodium carbonate

指标	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
滤失量/(m·L ⁻¹)	47.8	38.6	31.5	24	49.7	40.2	32.4	24.6
漏斗黏度/s	19.5	20.4	21	23	18.5	19.3	19.9	21.8

表 7 纯碱 CMC 膨润土泥浆试验结果

Table 7 Results of bentonite slurry with sodium carbonate and CMC

指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
滤失量/(m·L ⁻¹)	10.6	9.6	9.1	8.4	12.2	9	8.1	7.4	11.7	7.9	7	6
漏斗黏度/s	24.2	28.1	42.9	70.2	21.6	25.1	34.2	58.3	24.9	35.6	56.3	438.5

表 8 纯碱 PAM 膨润土泥浆试验结果

Table 8 Results of bentonite slurry with sodium carbonate and PAM

指标	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
滤失量/(m·L ⁻¹)	14.3	13.7	11.8	13.6	12.3	10.9	12.2	11.8	10.2
漏斗黏度/s	33.3	36.9	39.1	34.5	38.4	41.3	35.4	40	42.9

表 9 纯碱瓜尔胶膨润土泥浆试验结果

Table 9 Results of bentonite slurry with sodium carbonate and guar gum

指标	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
滤失量/(m·L ⁻¹)	32.6	31.9	31.1	26.1	25.3	24.4	20	19.6	18.8
漏斗黏度/s	24.2	27.8	35.2	24	27.8	38.4	32.4	35.9	51.6

了膨润土改性泥浆各主要成分用量与泥浆特性的量化分析, 提出了相应的优化计算公式, 为工程的泥浆应用选取提供了参考。

A 组是纯膨润土泥浆的试验组, 其试验结果如图 1 所示, 给出了膨润土含量为 50, 75, 100, 150 g 的泥浆滤失量和漏斗黏度值, 其拟合回归曲线为

$$y_{o1} = 12.57 + 47.28e^{-0.01x} \quad (\text{滤失量}) \quad (1)$$

$$y_{o2} = 15 + 0.88x^{0.43} \quad (\text{漏斗黏度}) \quad (2)$$

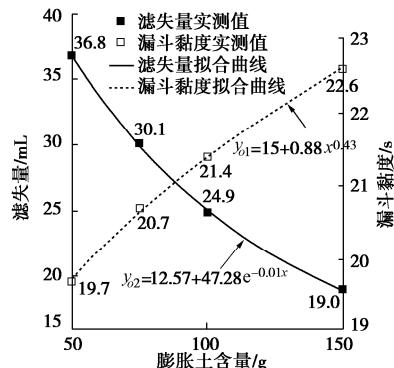


图 1 纯膨润土泥浆指标特征曲线图

Fig. 1 Characteristic curves of bentonite slurry

B 组试验是在膨润土泥浆中加入了纯碱, 其试验结果如表 6 所示。为了更清晰地反映纯碱与泥浆特性间的联系, 引入滤失量比 η_1 和漏斗黏度比 λ_1 分别来表示纯碱添加量与泥浆滤失量和漏斗黏度的影响:

$$\eta_1 = V_a / V_o \quad , \quad (3)$$

$$\lambda_1 = F_a / F_o \quad . \quad (4)$$

式中 V_a 和 F_a 为添加纯碱后的滤失量和漏斗黏度; V_o 和 F_o 为纯膨润土泥浆的滤失量和漏斗黏度。滤失量比 η_1 和漏斗黏度比 λ_1 与纯碱浓度 x_1 之间的关系 (见图 2) 可表示为

$$\eta_1 = 1.33 - 0.33e^{-0.22} \quad (\text{滤失量比}) \quad (5)$$

$$\lambda_1 = 0.92 + 0.08e^{0.47} \quad (\text{漏斗黏度比}) \quad (6)$$

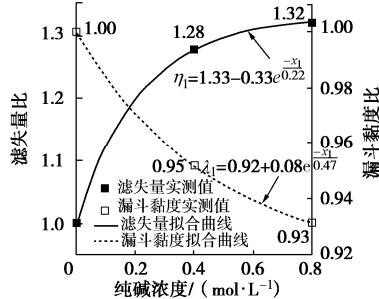


图 2 纯碱膨润土泥浆指标特征曲线图

Fig. 2 Characteristic curves of bentonite slurry with sodium carbonate

C 组、D 组、E 组探究了聚合物添加量与泥浆特性之间的关系, 如表 7~9 所示, 聚合物的添加能显著提高泥浆漏斗黏度, 降低滤失量。CMC 在降低滤失量方面更为突出, PAM 则在提高漏斗黏度方面更为出色, 而瓜尔胶能在较少的添加量下, 明显提升泥浆的工程特性。这里再引入滤失量比 η_2 和漏斗黏度比 λ_2 分别来表示聚合物添加量与泥浆的滤失量和漏斗黏度的影响, 其表达式可表示为

$$\eta_2 = V_a / V_n \quad , \quad (7)$$

$$\lambda_2 = F_a / F_n \quad , \quad (8)$$

式中, V_a 和 F_a 为添加聚合物和纯碱后的泥浆滤失量和漏斗黏度。

图 3~5 分别给出了 CMC、PAM 和瓜尔胶 3 种聚合物添加量与泥浆液滤失量比和漏斗黏度比的关系曲线, 其曲线关系可分别表示为

滤失量比:

$$\eta_2 = \begin{cases} 0.20 + 0.80e^{-1.69x_2} & \text{(CMC)} \\ 0.29 + 0.71e^{-2.47x_2} & \text{(PAM)} \\ 0.81 + 0.19e^{-23.77x_2} & \text{(瓜尔胶)} \end{cases}, \quad (9)$$

漏斗黏度比:

$$\lambda_2 = \begin{cases} 1 + 0.04x_2 + 0.10x_2^2 & \text{(CMC)} \\ 1 + 0.79x_2^{0.52} & \text{(PAM)} \\ 1 + 2.69x_2 - 1.84x_2^2 & \text{(瓜尔胶)} \end{cases}. \quad (10)$$

综上所述, 聚合物改性膨润土的滤失量 y_1 和漏斗黏度 y_2 可用纯膨润土泥浆的指标 y_{o1} , y_{o2} 与滤失量比 (η_1, η_2) 和漏斗黏度比 (λ_1, λ_2) 的乘积表示:

$$y_1 = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot y_{o1} \quad (\text{滤失量}), \quad (11)$$

$$y_2 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot y_{o2} \quad (\text{漏斗黏度}). \quad (12)$$

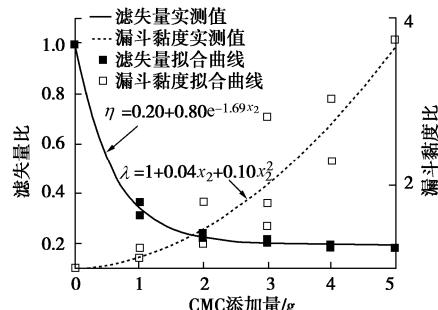


图3 纯碱CMC膨润土泥浆指标特征曲线图

Fig. 3 Characteristic curves of bentonite slurry with sodium carbonate and CMC

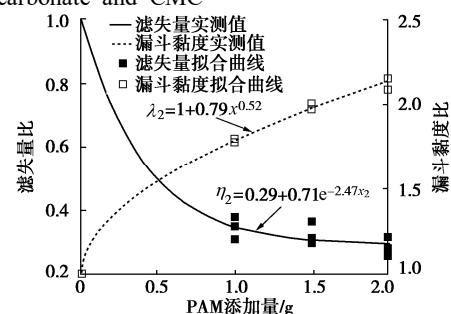


图4 纯碱PAM膨润土泥浆指标特征曲线图

Fig. 4 Characteristic curves of bentonite slurry with sodium carbonate and PAM

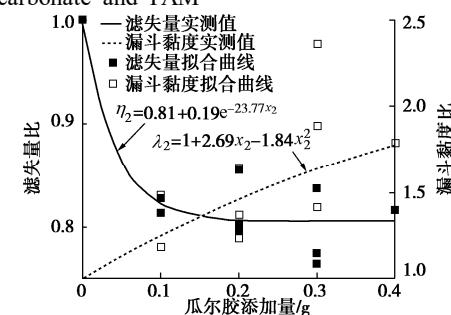


图5 纯碱瓜尔胶膨润土泥浆指标特征曲线图

Fig. 5 Characteristic curves of bentonite slurry with sodium carbonate and guar gum

3 聚合物的关联性分析

为了更清晰地分析聚合物与泥浆特性之间的关系,

选用漏斗黏度比 η_2 和滤失量比 λ_2 来表示聚合物添加量与泥浆漏斗黏度和滤失量的影响, 采用关联度分析法以量化分析各聚合物对泥浆特性的影响。

根据表3~5中的膨润土用量和纯碱浓度关系, 每种聚合物都可分为3个组别进行分析计算, 将每25 g膨润土中的聚合物含量、漏斗黏度比 η_2 和滤失量比 λ_2 作为分析变量。采用绝对灰关联度分析其间关联性, 可按下式计算^[14]:

$$\varepsilon(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left| \frac{1 + (x_0(k+1) - x_0(k))(x_i(k+1) - x_i(k))}{\sqrt{1 + (x_0(k+1) - x_0(k))^2} \sqrt{1 + (x_i(k+1) - x_i(k))^2}} \right| + 1 \right). \quad (13)$$

式中 X_0 为25 g膨润土中的聚合物相对含量; X_i 为泥浆漏斗黏度比 η_2 ; X_2 为泥浆滤失量比 λ_2 。

表10给出了关联度的计算结果, 各种聚合物与黏度和滤失量的关联程度整体较高, 说明了聚合物的添加对泥浆的黏度和滤失量造成显著影响。值得注意的是, C9-C12和E7-E9中的漏斗黏度关联度偏小的原因, 主要是因为C12和E9中的漏斗黏度急速升高所导致的数据关联性减弱。整体上, 随着膨润土添加量的增大, PAM和瓜尔胶的泥浆漏斗黏度比呈下降趋势, 而CMC与此相反, 说明膨润土的增加, 能够增大泥浆漏斗黏度, 且CMC能更好的与膨润土共同作用增加泥浆漏斗黏度。同时, 随着膨润土添加量的增大, 泥浆滤失量黏度比均呈上升趋势, 说明各种聚合物对泥浆滤失量的作用均受到了泥浆中膨润土的含量的影响。

表10 绝对灰色关联度计算结果

Table 10 Results of absolute degrees of gray incidence carbonate and guar gum

高聚物	组别	漏斗黏度比关联度	滤失量比关联度
CMC	C1-C4	0.9286	0.8666
	C5-C8	0.9604	0.8812
	C9-C12	0.8218	0.9095
PAM	D1-D3	0.9927	0.8517
	D4-D6	0.9846	0.8955
	D7-D9	0.9772	0.9176
瓜尔胶	E1-E3	0.9808	0.9938
	E4-E6	0.9683	0.9946
	E7-E9	0.8211	0.9988

4 结论

本文通过室内试验对CMC、PAM和瓜尔胶3种聚合物对膨润土泥浆滤失量和漏斗黏度的影响进行了分析研究, 主要得到以下3点结论。

(1)展开了不同聚合物对泥浆漏斗黏度和滤失量影响的量化分析, 得到了合理范围内的相应指标预测公式, 以方便实际工程应用中的选取。

(2)分析了不同聚合物添加量与漏斗黏度和滤失量间的关联性, 聚合物的添加能够显著增大泥浆漏斗黏度并减小泥浆滤失量。

(3) 膨润土含量更高的泥浆, 其聚合物对泥浆工程特性的改善作用越为突出。其中, CMC 能更好的与膨润土共同作用增加泥浆漏斗黏度, 各种聚合物对泥浆滤失量的作用则均受到了泥浆中膨润土含量的影响。

参考文献:

- [1] 徐征杰, 郭晓阳. 基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 194–200. (XU Zheng-jie, GUO Xiao-yang. Optimization of bentonite parameters for shield tunneling based on response surface method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 194–200. (in Chinese))
- [2] 傅贤雷, 杜延军, 沈胜强, 等. PAC 改性膨润土/砂竖向阻隔屏障回填料化学渗透膜效应及扩散特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3669–3675. (FU Xian-lei, DU Yan-jun, SHEN Sheng-qiang, et al. Chemico-osmotic membrane behavior and diffusive properties of PAC amended bentonite/sand vertical cutoff wall backfills[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3669–3675. (in Chinese))
- [3] 张天兰. 膨润土泥浆在工程中的应用[J]. 水运工程, 1993(9): 7–9. (ZHANG Tian-lan. Application of bentonite slurry in project[J]. Port & Waterway Engineering, 1993(9): 7–9. (in Chinese))
- [4] 王抚养, 陈泉水, 罗太安, 等. 膨润土的改性研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(4): 775–779. (WANG Fu-fu, CHEN Quan-shui, LUO Tai-an, et al. Research progress of modification on bentonite[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(4): 775–779. (in Chinese))
- [5] CHENG W C, WANG L, XUE Z F, et al. Lubrication performance of pipejacking in soft alluvial deposits[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 102991.
- [6] WANG J F, WANG K, ZHANG T, et al. 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, 72: 323–332.
- [7] REILLY C C, ORR T L L. Physical modelling of the effect of lubricants in pipe jacking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 44–53.
- [8] 杨烨旻. 顶管施工注浆作用及环境效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (YANG Ye-min. Research on Grouting Mechanism and Environmental Effects of Pipe Jacking[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [9] 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. (WEI Gang, XU Ri-qing, SHAO Jian-ming, et al. Research on mechanism of reducing friction through injecting slurry in pipe jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 930–934. (in Chinese))
- [10] 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. (WANG Chun-ting, LONG Wei. Experimental study on the slurry formulation used for the large diameter long distance pipe-jacking project[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 106–111. (in Chinese))
- [11] 黄建华, 陈月香, 王蕴晨, 等. 大断面顶管工程减摩泥浆配合比实验研究[J]. 福建工程学院学报, 2019, 17(3): 212–218. (HUANG Jian-hua, CHEN Yue-xiang, WANG Yun-chen, et al. Experimental study on the mix ratio of anti-friction slurry in large-section pipe jacking engineering[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2019, 17(3): 212–218. (in Chinese))
- [12] HAYATI-ASHTIANI M. Characterization of nano-porous bentonite (montmorillonite) particles using FTIR and BET-BJH analyses[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2011, 28(3/4): 71–76.
- [13] 王明胜, 刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 182–189. (WANG Ming-sheng, LIU Da-gang. Test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182–189. (in Chinese))
- [14] LIU J. A new absolute degree of grey incidence and its application[C]//2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS 2009). 2009, Nanjing.

(编校: 孙振远)