

复杂岩层钻孔灌注桩泥浆选型试验研究

王建军^{1,2}, 彭振斌¹, 刘睦峰^{1,2}, 彭文祥¹

- (1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湖南省煤田地质局, 湖南 长沙, 410014)

摘要: 将聚丙烯酰胺(PAM)和部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)作为絮凝剂、防塌剂、增黏剂和堵水剂,用于大直径钻孔灌注桩施工。在吸附试验中,在固液比为1:50、温度为(20±0.2)℃时,采用淀粉-碘化镉比色法,根据PAM(或HPAM)标准曲线,测量其吸附平衡后的离心液浓度,由吸附前后的PAM(或HPAM)浓度计算每克黏土的吸附量。试验结果表明:黏土颗粒随着溶液中钠离子浓度的增加,吸附HPAM的含量也增加;随着溶液pH值、水解度和温度的增加,吸附HPAM含量降低;聚丙烯酰胺的技术参数确定为:阴离子型,相对分子质量为(3.0~5.0)×10⁸,水解度为30%~50%;在施工中,使用该配方调制的泥浆,能有效地防止黏卡事故的发生,成孔率显著提高。

关键词: 钻孔灌注桩;泥浆;选型试验

中图分类号: P634.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)02-0673-06

Mud selection test of drill-pouring pile in complex rock

WANG Jian-jun^{1,2}, PENG Zhen-bin¹, LIU Mu-feng^{1,2}, PENG Wen-xiang¹

- (1. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Coal Geology Bureau of Hunan Province, Changsha 410014, China)

Abstract: Polyacrylamide (PAM) and partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) were used in construction of large diameter bored piles as flocculant, anti-sloughing agent, tackifier and the blocking agent. In the adsorption experiment, the ratio of solid to liquid was 1:50, temperature was (20±0.2)℃, a cadmium iodide starch assay was used according to PAM (or HPAM) standard curve, and the adsorption equilibrium of centrifugal concentration was measured before and after adsorption of PAM (or HPAM) and the concentration of adsorption per gram of clay. The results show that clay particles increase with the increase of concentration of sodium in solution, and adsorption of HPAM also increases. With the increase of pH value, temperature and degree of hydrolysis, the contents of HPAM reduces. The technical parameters of polyacrylamide defined are as follows: anionic type, relative molecular mass (3.0–5.0) × 10⁸, the degree of hydrolysis of 30%–50%. Using the formula modulation mud can effectively prevent the occurrence of sticky cards, and hole increases significantly.

Key words: drill-pouring pile; mud; selection test

大直径钻孔灌注桩由于具有能适用各种地层条件、能制成各种桩径和桩长、能满足不同承载能力要求等诸多优点,被广泛应用于许多特大型基础工程施工中,尤其是深水、大跨径桥梁基础工程施工中,并

不断向超大超深方向发展。由于工程地质条件越来越复杂,施工风险也越来越大。目前,聚丙烯酰胺(PAM)和部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)已被广泛用于大直径钻孔灌注桩施工,作为絮凝剂、防塌剂、增黏剂和堵

收稿日期: 2009-08-08; 修回日期: 2009-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878212)

通信作者: 王建军(1970-),男,湖南双峰人,博士研究生,高级工程师,从事地质工程施工管理、地基与基础处理以及大口径超深孔桩基础施工的应用研究;电话: 0731-85648608; E-mail: hnjc_wjj@126.com

水剂,其效果与吸附作用密切相关。Scoggins 等^[1-2]探讨了淀粉-碘化镉比色法及等温吸附理论方法;李小青等^[3-11]分析了大直径钻孔灌注桩的泥浆护壁机理与孔壁稳定的关系;Olibar 等^[12-15]探讨了泥质砂岩的导电性及泥浆流变的 Herschel-Bulkley 模型。在此,本文作者结合正在施工的某长江大桥的工程特征,对 PAM 和 HPAM 在黏土颗粒表面上的等温吸附规律和影响吸附的各个因素进行试验研究。

1 桥位区工程地质特征

主墩设计桩径为 2.8 m,设计桩长为 75.0 m,钻孔孔深为 95.0 m,总桩共 22 根。工程部分桩孔的地质剖面如图 1 所示,其主要工程地质条件如下:覆盖层为粉~砾砂层,厚度为 24.0~25.0 m(标高为+6.1~-18.7 m),基岩顶部为破碎严重(强风化)粉砂质泥岩₁₋₃,其下以破碎较严重(中风化)粉砂质泥岩为₁₋₂主,其中夹有透镜状的₁₋₃,₁₋₁或₁泥岩,下部以破碎(中风化)粉砂质泥岩₁₋₁为主,夹有透镜状的₁₋₁泥岩;₁₋₃层在该墩发育的规模较小,在下游北面局部较厚,达到 25.0 m,最薄处仅 3.0~5.0 m,局部甚至未能揭露;₁₋₂层泥岩在位于墩位中心线附近的钻孔中较多揭露,其次在南面上、下游角分布亦较多;₁₋₁及

₁层泥岩分布范围及厚度较大。由图 1 可见地层特征主要为:

- (1) 覆盖层松散易钻,但孔壁稳定性差,常出现塌孔、超径等问题,对泥浆性能要求高。
- (2) ₁₋₃层具有遇水容易软化崩解的特性,对泥浆的性能也要求较高。因此,最大限度地抑制泥岩的水敏水化,才能起到良好的护壁效果,抑制泥岩水敏水化的关键在于处理剂成分的选择和组合。

2 实验条件和方法

2.1 矿物成分分析

从黏土矿物学可知:泥岩主要由蒙脱石、伊利石和高岭石矿物组成。黏土矿物具有遇水膨胀、分散的特点。其水化的突破口是裸露在晶胞表面的硅氧四面体的氧原子层:这层氧原子层每 6 个氧原子形成 1 个正六角环,这个氧六角环的空穴直径为 2.8×10^{-10} m, K^+ 直径为 2.66×10^{-10} m,并因 K^+ 吸附能力强,恰好可镶嵌在这一空穴中,形成最紧密的结构,水和极性分子都不易进入层间,并且可通过层间 K^+ 把两层拉得很紧,这就可以有效地控制泥岩分散和水化膨胀。在泥浆中加入 K^+ 还会趋向封闭孔壁上泥岩的破坏楔并将

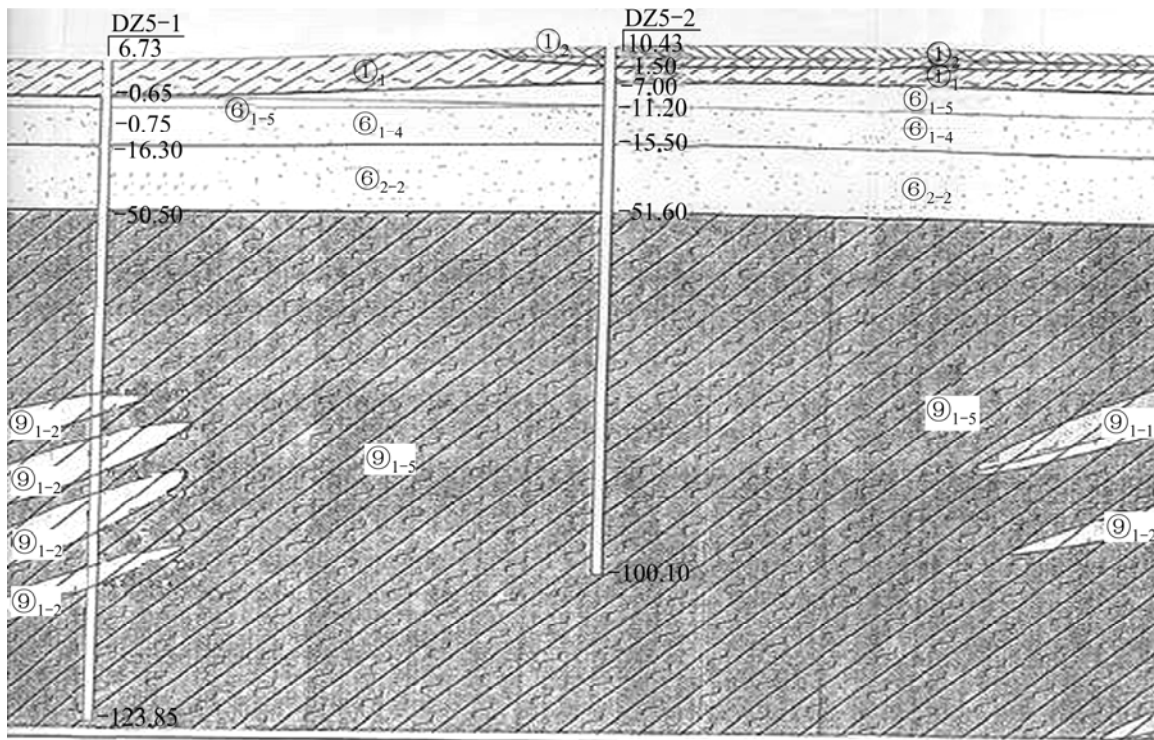


图 1 工程地质剖面图

Fig.1 Engineering geological profile

其紧密约束。K⁺含量足够大的钾基泥浆具有很强的抑制泥岩水化作用。

2.2 试验方法的确定

在吸附试验中, 温度为(20 ± 0.2) , 固液比为 1:50, 在不停地摇动下吸附 2 h。用淀粉-碘化镉比色法^[1], 根据 PAM(或 HPAM)标准曲线, 测其吸附平衡后的离心液浓度, 由吸附前后的 PAM(或 HPAM)质量浓度计算每克黏土的吸附量。

3 聚丙烯酰胺技术指标试验分析

3.1 PAM 溶液质量浓度与黏土颗粒表面的吸附因素

PAM 被黏土颗粒吸附, 主要靠酰胺基与黏土颗粒之间形成氢键而吸附。随着 PAM 溶液质量浓度的增加, 形成氢键的机会越多, 黏土的吸附量也逐渐增加。当达到饱和吸附时, 黏土的吸附量不再随 PAM 溶液质量浓度的增加而增大。由试验所得 PAM 等温吸附曲线见图 2, 可见: 曲线形状基本上与 Langmuir 等温吸附曲线形状相同。

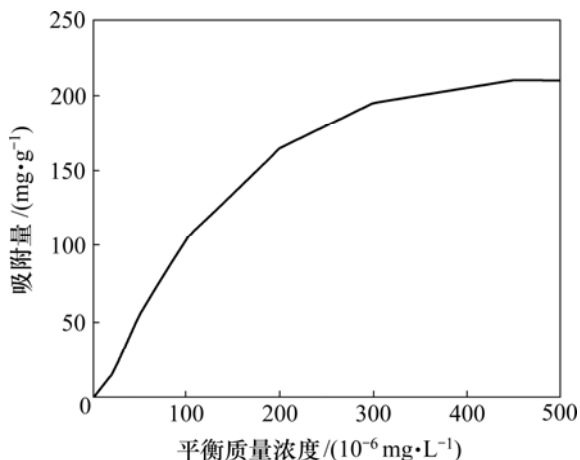


图 2 PAM 等温吸附试验曲线

Fig.2 PAM adsorption isotherm test curve

3.2 溶液 pH 值对吸附量的影响

实验中, HPAM 的水解度为 30.2%, 初始质量浓度 205.8 mg/L, 将溶液的 pH 值调到 7; 分散黏土和定容所用的蒸馏水, 调至不同 pH 值。PH 值对 HPA 吸附量的影响见图 3。可见: 随着 pH 值的增加, 黏土颗粒表面吸附 HPAM 的含量下降, 开始降得快, 以后变化平缓。其原因是: 随着 pH 值逐渐降低, HPAM 分子长链上—COONa 基团中的 Na⁺逐渐被 H⁺取代, 变成—COOH 基团。—COOH 基团不仅减少了 HPAM 分子链上的负电性, 也增加了 HPAM 分子与黏土颗粒形

成氢键的能力。因此, 随着溶液 pH 值降低, 黏土颗粒吸附 HPAM 的含量增加。

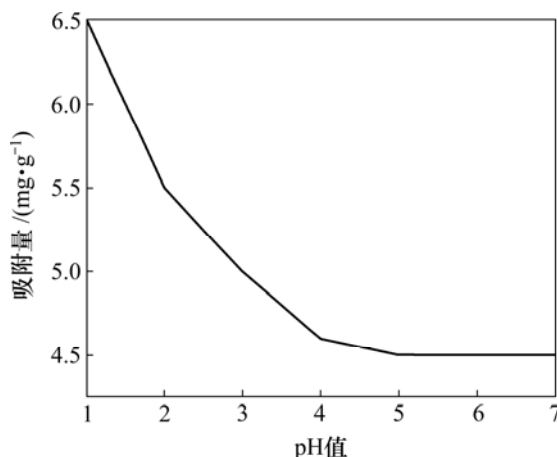


图 3 pH 值对 HPAM 吸附量的影响

Fig.3 Effect of pH value on adsorption of HPAM

3.3 温度对 HPAM 吸附量的影响

将质量浓度为 617.4 mg/L 的 HPAM 溶液, 加入已知黏土质量的悬浮液中, 在不同温度的水浴中密闭加热, 在不同温度下吸附, 结果如图 4 所示。可见: 随着温度升高, 黏土颗粒表面上的吸附量降低。

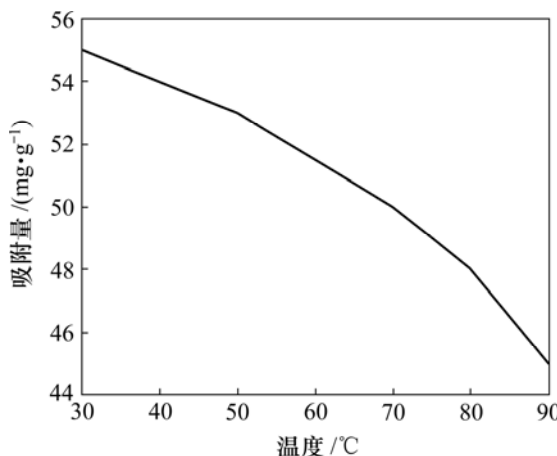


图 4 温度对 HPAM 吸附量的影响

Fig.4 Effect of temperature on adsorption of HPAM

3.4 水解度对 HPAM 吸附量的影响

将 PAM 配成不同的水解度, HPAM 溶液质量浓度为 199.96 mg/L, pH 值为 8, 吸附在含盐质量浓度为 30 g/L 时进行, 溶液水解度对吸附量的影响如图 5 所示。可见: 随着水解度的增加, 黏土颗粒表面上吸附 HPAM 的含量降低。其原因是: 当水解度逐渐增加时, HPAM 分子长链上的—COONa 基团逐渐增多,

因负电性增强而与黏土颗粒的斥力变大,同时,因长链拉直,使在黏土颗粒表面上的吸附密度降低;此外,随着水解度的增大,HPAM分子链上吸附性基团减少。

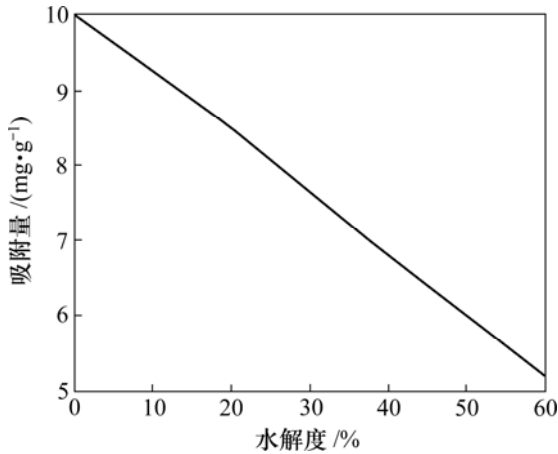
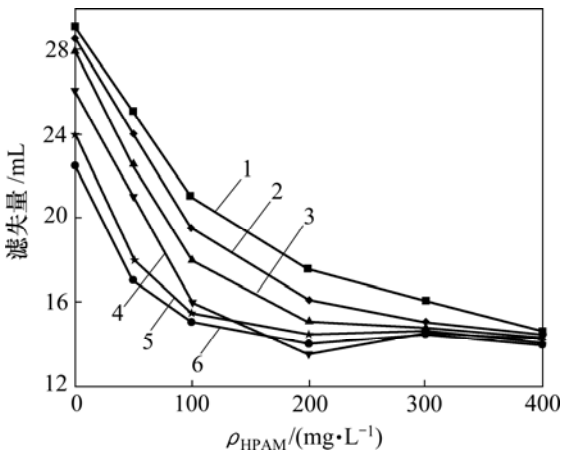


图 5 HPAM 吸附量与水解度的关系

Fig.5 Relationship between HPAM adsorption capacity and degree of hydrolysis

3.5 HPAM 对钠膨润土泥浆滤失量的影响

不同类型的絮凝剂对钠膨润土泥浆滤失量的影响是不同的。无机电解质或其他阳离子压缩双电层而产生絮凝作用的絮凝剂,它们都会使钠膨润土泥浆的滤失量上升。而非离子或阴离子型的高分子絮凝剂在不同程度上会降低钠膨润土泥浆的滤失量,试验结果如图 6 所示。



相对分子质量: 1—(5.0~9.0) × 10⁸; 2—(3.0~5.0) × 10⁸; 3—3.5 × 10⁸; 4—2.2 × 10⁸; 5—2.0 × 10⁸; 6—1.6 × 10⁸

图 6 HPAM 质量浓度对钠膨润土泥浆滤失量的影响
Fig.6 Influence of mass concentration of HPAM on sodium bentonite filtration

结合泥岩的水理性质及其崩解特征,综合试验结果,确定如下聚丙烯酰胺的技术参数:阴离子型电

质,相对分子质量为(3.0~5.0) × 10⁸,水解度为 30%~50%。

4 泥浆的护壁作用与泥浆性能指标的调配

4.1 泥浆的护壁作用分析

泥浆的护壁机理主要表现在 2 个方面:隔水膜的形成及泥浆液态静压力。隔水膜的形成要求土层具有一定的渗透性,否则,很难使孔壁形成隔水膜泥浆在液压作用下浸入土层,在一定范围内,泥浆凝胶体黏附在土颗粒上,固定了土颗粒的相对位置,在孔壁周围(0~2 m)形成较稳定的土层,使土层抗剪强度增加,从而使孔壁维持稳定。泥浆继续渗透使泥浆中的土颗粒逐渐填补了孔壁土层的空隙,从而堵塞了水道,在孔壁形成泥皮即隔水膜,如图 7 所示。



图 7 泥浆工作机理

Fig.7 Mechanism of mud job

泥浆的液态静压力可以有效地作用在孔壁上,且减少了渗透性,保持了孔壁的稳定。泥浆的液态静压力可以抵抗作用在孔壁上的土压力和水压力,并防止地下水渗入。因为钻孔破坏了原状土的受力平衡,孔壁面土体静土压力减少,孔壁的空隙水压成为负值,对土体产生了抗拉作用。然而,当孔内充满泥浆时,液压力在孔壁面上平衡土压力,同时,泥浆中的细小土颗粒向土层渗入也增大了土层的强度,从而保持了孔壁的稳定。另一方面,泥皮对桩的强度、压缩性变形等方面都造成不利影响。因为泥皮改变了桩、土接触面的性质,使桩侧摩阻力下降,从而使桩体承载力下降。泥皮越厚,承载力下降越明显。

由此可见,泥浆具有稳定护壁作用,首先表现为

泥浆静水压力作用, 对地下水产生超压力, 起稳定平衡作用; 其次表现为泥皮作用。泥浆在孔壁上形成不透水泥皮薄膜, 阻止泥浆渗透至周围土中或者地下水侵入孔内与泥浆混合, 促进孔壁稳定。同时, 泥浆具有抑制地层的作用, 主要表现为泥浆的凝胶作用。

4.2 泥浆的原料和配比分析

钻孔泥浆由水、黏土(或膨润土)和添加剂组成。泥浆原料宜尽可能使用膨润土, 膨润土具有密度低、黏度大、含砂量和失水量少、泥皮厚度小、稳定性强、固壁能力强、钻具回旋阻力小、钻进率高、造浆能力强等优点。膨润土有钠质和钙质 2 种, 钠质膨润土比钙质膨润土优。结合本项目的地层特征, 为抑制泥岩水化膨胀, 并有效地清除冲洗液中的无用固相, 选择聚丙烯酰胺作为絮凝剂。由于黏土矿物晶格结构不同(如蒙脱石负电性强, 水化作用强), 水化膜厚可妨碍高分子物吸附架桥作用, 同时, 由于负电性强, 双电子中的电动电位高, 对絮凝剂中的阴离子基产生斥力, 妨碍絮凝作用。蒙脱石在水中的分散度高, 即使有少量被絮凝, 影响也不大; 而高岭石等矿物水化膜厚, 电动电位低, 分散度小, 因而容易被吸附絮凝。通过实验确定泥浆配比见表 1, 基浆的性能指标见表 2。

表 1 PHP 泥浆原料和基本配比

Table 1 Raw materials and their contents of PHP mud

材料	材料种类	掺入量
原材料	膨润土	水用量的 8.00%~10.00%
提黏剂	轻基纤维素(CMC)	膨润土用量的 0.05%~0.10%
	聚丙烯睛钙(CPAN)	膨润土用量的 0.05%~0.10%
分散剂	铬铁木质素磺酸钠盐(FCI)	膨润土用量的 0.10%~0.30%
	纯碱(Na ₂ CO ₃)	泥浆用量的 0.10%~0.40%
絮凝剂	聚丙烯酰胺 PHP	泥浆用量的 0.003%

表 3 钻进过程中的泥浆性能

Table 3 Performance of mud in process of drilling

地层	相对密度	黏度/s	含砂率/%	胶体率/%	泥皮厚度(30 min 时)/mm	pH 值
淤泥(护筒内)	1.20~1.23	17~18	3~4	95	3	8~10
黏土层	1.15~1.20	17~18	3~4	95	3	8~10
分细砂层	1.15~1.20	19~20	3~4	95	3	8~10
砾石层	1.10~1.25	18~19	3~4	95	3	8~10
岩石层	1.15~1.17	18~19	2~4	95	3	8~10

表 2 基浆泥浆性能

Table 2 Performance of pulp slurry

相对密度	黏度/s	含砂率/%	胶体率/%	失水量/mL	泥皮厚度/mm	pH 值
1.06~1.08	21~23	4	98	20	1.5	8~10

4.3 现场泥浆性能指标的监测与控制

(1) 根据不同地层的岩性特点, 配制不同性能的泥浆以满足不同地层的要求。上部以细砂岩、黏土为主的层段, 砂砾较粗, 且易造成浆。为了抑制造浆和护壁, 并提高对岩屑的携带悬浮能力, 以 HPAM 为主剂, 加入适量的轻基纤维素(CMC), 把失水量控制在 20 mL/h 之内; 进入大段泥岩时, 为抑制泥岩的水化膨胀, 转入以聚丙烯睛钙(CPAN)为主, 加入适量的 HPAM 作为护胶稳定剂; 若遇到破碎严重段时, 可加入重晶石粉 BaSO₄, 以提高防塌能力。各层的泥浆性能指标见表 3。

(2) 现场维护, 加强泥浆管理。每天对泥浆性能进行检测, 根据检测结果, 结合不同地层随时对泥浆性能进行调整, 具体方法如下:

若黏度增高、失水偏大, 可加入 HPAM 和 CPAN 水溶液处理。

若黏度不高、失水偏大, 可加入 CPAN 水溶液处理。

若黏度偏高、絮凝物少, 且失水不大, 可加入 HPAM 水溶液或清水处理。

若 pH 值过低, 可加入纯碱 Na₂CO₃ 进行处理。当含砂率超标, 需开启泥浆分离器, 降低含砂率。

当钻进深度离终孔还有 2 m 时, 应对泥浆的性能进行 1 次调整, 可加入 HPAM 和 CPAN 水溶液, 将泥浆黏度提高到 20 s 以上, 并开启泥砂处理器, 降低含砂率, 慢慢地加入清水, 以补充泥砂处理器清除砂后的体积并降低密度。

5 结论

(1) 黏土颗粒随着溶液中钠离子浓度的增加, HPAM 的吸附量也增加;随着溶液 pH 值、水解度和温度的增加, HPAM 的吸附量降低。

(2) 在大口径深孔作业过程中, 常因絮凝剂的性能参数选用不当, 导致泥浆性能指标很难达到施工作业要求。通过室内试验和工程检验, 在淡水造浆采用聚丙烯酰胺作为絮凝剂时, 其技术参数如下: 阴离子型电解质, 相对分子质量为 $(3.0\sim 5.0) \times 10^8$, 水解度为 30%~50%。

(3) 通过室内试验调配的泥浆材料及其配合比, 有很好的护壁堵漏及防坍塌作用, 对大口径桩基施工具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] Scoggins M W. Determination of water-soluble polymers containing primary amide groups using the starch-triiodide method[J]. 1979(6): 726-732.
- [2] Rauss G K. Adsorption of Elastomers on carbon black[J]. Ind Eng Chem, 1995(47): 1809.
- [3] 李小青, 郝行舟, 朱宏平, 等. 大口径钻孔灌注桩的孔壁稳定性研究分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2007, 24(2): 25-28.
LI Xiao-qing, HAO Hang-zhou, ZHU Hong-ping, et al. Analysis on the stability of hole wall of large diameter bored pile[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2007, 24(2): 25-28.
- [4] La R, Wanapum R S. Development-slurry trench and grouted cut-off[C]//Proceedings of Symposium: Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths, London, 1963: 2657-2664.
- [5] Gill S A. Applications of slurry walls in civil engineering[J]. Journal of Construction Division, ASCE, 1980(106): 156-167.
- [6] 徐奋强, 王旭. 护壁泥浆与孔壁稳定性及极限孔深[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2004, 23(4): 9-12.
XU Fen-qiang, WANG Xu. Research on stability of hole wall of deep bore hole with mud dado and limit deepness of bore hole[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences, 2004, 23(4): 9-12.
- [7] 张雄文, 管义军, 周建华. PHP 泥浆在桥梁超长超大直径钻孔灌注桩施工中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2571-2575.
ZHANG Xiong-wen, GUAN Yi-jun, ZHOU Jian-hua. Application of PHP slurry to drilling of over-length and extra-large diameter bored-piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2571-2575.
- [8] 张兴国, 刘崇建, 杨远光, 等. 水泥浆体系稳定性对水泥浆失重的重要影响[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(3): 68-71.
ZHANG Xing-guo, LIU Cong-jian, YANG Yuan-guang, et al. Important influence about stability of the cement mud system to losing the heavy[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(3): 68-71.
- [9] 肖云辉. 砂卵石地层钻孔灌注桩基础的施工[J]. 南平师范专科学校学报, 2003, 22(2): 62-66.
XIAO Yun-hui. Drilling pile construction in sandy gravel[J]. Journal of Nanping Teachers College, 2003, 22(2): 62-66.
- [10] 李奋强, 彭振斌, 杨坪, 等. 海洋中大口径钻孔灌注桩施工工艺的探讨[J]. 施工技术, 2004, 33(5): 39-41.
LI Fen-qiang, PENG Zhen-bin, YANG Ping, et al. The exploration of construction technology of large diameter drilled grouting pile in sea[J]. Construction Technology, 2004, 33(5): 39-41.
- [11] 谷天本, 蒋国盛. 反循环钻孔灌注桩钻进技术探讨[J]. 山西建筑, 2001, 34(5): 134-135.
GU Tian-ben, JIANG Guo-sheng. Discussion on the reverse circulation drilling cast-in-place pile drilling technique[J]. Shanxi Building, 2001, 34(5): 134-135.
- [12] Olibar A L, Lima D, Mulul M. A grain conductivity approach to shaly sandstones[J]. Geophysics, 1990, 55(10): 1347-1355.
- [13] Zomora M, Bleier R. Prediction of drilling mud rheology using a simplified Herschel-Bulkley model[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 99(3): 485-490.
- [14] McKyes E, Ali O S. The cutting of soil by a narrow blade[J]. J Terramech, 1997, 14(2): 43-58.
- [15] ZHANG Ji, Kushwaha R L. A modified model to predict soil cutting resistance[J]. Soil & Tillage Research, 1995(34): 157-168.

(编辑 陈灿华)