

两种高抗硫酸盐水泥稳定浆液性能对比试验研究

李永丰^{1,2}, 李建中¹, 陈颖²

(1.中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

2.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要:向家坝水电站坝基挠曲核部破碎带补强灌浆浆液采用高抗硫酸盐水泥浆液。灌浆孔深多超过 150 m, 钻灌施工过程中, 其浆液稳定性、可灌性、固壁性、泌水性、初凝时间、结石体强度等, 较常规工艺有更高的要求。为此, 结合向家坝水电站坝基补强灌浆处理, 现场开展了“掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液”与“改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液”对比试验研究。研究发现, 采用六偏磷酸钠替代缓凝型高效减水剂作为缓凝剂与分散剂的改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液稳定性、可灌性、固壁性、泌水性、初凝时间、结石体强度等性能均较掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液更优, 其性能与工艺的匹配性更好。

关键词:高抗硫酸盐水泥; 稳定浆液; 浆液性能; 现场试验; 补强灌浆

中图分类号:TQ172.7;TV223.3⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672—7428(2020)07—0088—06

Experimental study on performance comparison of two kinds of high sulfate-resistant cement stabilized grout

LI Yongfeng^{1,2}, LI Jianzhong¹, CHEN Ying²

(1.School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2.PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan 410014, China)

Abstract: High sulfate-resistant cement grout was used for reinforcing the fractured zone in the flexural core of the dam foundation of Xiangjiaba Hydropower Station. Since the depth of grouting holes was more than 150m, higher requirements were specified for the grout than those used in the conventional process in terms of the stability, groutability, wall reinforcement, separation, initial setting time, strength of stone body, etc. during drilling and grouting construction. Therefore, research has been carried out to compare the high sulfate resistance cement added with the retarded water reducer and the modified the high sulfate resistance cement to deal with the reinforcement of the dam foundation of Xiangjiaba Hydropower Station with grouting treatment, and preliminary results have been achieved. It is found that the stability, groutability, wall reinforcement, separation, initial setting time and stone strength of the modified high sulfate-resistant cement slurry with sodium hexametaphosphate instead of the retarded superplasticizer as the retarder and dispersant are better than those of the high sulfate-resistant cement slurry with the retarded superplasticizer, and its performance is better matched with the process.

Key words: high resist-sulfate cement; stable grout; grout performance; field test; reinforcement grouting

0 引言

向家坝水电站挠曲核部破碎带补强灌浆处理采用高压冲挤灌浆技术。基于挠曲核部破碎带碎屑状不良结构特性和高水头渗流条件, 补强灌浆按照先固孔止水、后高压冲挤组合灌浆工艺进行^[1]。由于

向家坝水电站坝基深层地下水富含硫酸根离子, 普通水泥浆液很难满足抗硫酸盐侵蚀的要求, 为此, 挠曲核部破碎带补强灌浆采用了高抗硫酸盐水泥。

硫酸根离子主要是通过与浆液结石中水化铝酸钙与水化氢氧化钙发生反应, 生成含硫酸盐结晶膨

收稿日期: 2020—03—03; 修回日期: 2020—06—08 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.07.015

作者简介: 李永丰, 男, 汉族, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事地质工程方面的研究与实践工作, 湖南省长沙市雨花区香樟东路 16 号中南家园中南水建办公楼, 38853023@qq.com。

引用格式: 李永丰, 李建中, 陈颖. 两种高抗硫酸盐水泥稳定浆液性能对比试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 88—93.

LI Yongfeng, LI Jianzhong, CHEN Ying. Experimental study on performance comparison of two kinds of high sulfate-resistant cement stabilized grout[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 88—93.

胀体来侵蚀破坏浆液结石体,而水化铝酸钙与氢氧化钙主要是 C_3S 和 C_3A 水化产物。故此,高抗硫酸盐水泥严格限制了 C_3S 与 C_3A 的含量(相应增加 C_2S 、 C_4AF 含量),从而也就限制了水化铝酸钙与氢氧化钙数量,来达到提高抵抗硫酸根离子的侵蚀的能力。也正是因为高抗硫酸盐水泥中发生水化反应的 C_3S 和 C_3A 较普通硅酸盐水泥含量减少,发生水化反应量大大降低,导致高抗硫酸盐水泥保水性、稳定性相对普通水泥大为降低^[2-3]。研究表明,高抗硫酸盐水泥浆液析水率而言,在 0.6~0.8 的水灰比情况下,较普通水泥浆液大 30% 左右^[4]。膨润土作为浆液稳定剂已有多年研究,由于其价格低廉,使用方便,试验过程中优先选择膨润土作为稳定剂。但考虑到膨润土添加量对浆液结石强度的影响,参考普通水泥稳定浆液添加量,宜控制在 5% 以下^[4-6]。试验发现对于高抗硫酸盐水泥,膨润土添加量 $<5\%$ 时,难以达到稳定浆液所要求的析水率指标。为解决此问题,向家坝水电站补强灌浆处理开展了高抗硫酸盐水泥稳定浆液研究并取得了初步成果,形成了“掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液”与“改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液”2 种高抗硫酸盐水泥稳定浆液。

基于向家坝水电站坝基挠曲核部破碎带补强灌浆孔较深(多超过 150 m),钻灌施工过程中,其浆液稳定性、可灌性、固壁性、泌水性、初凝时间、结石体强度等,较常规工艺提出了更高的要求^[1,7-8]。为进一步优化研究成果,实现浆液与工艺匹配,现场开展了“掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液”与“改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液”对比试验研究。

1 试验目的

结合向家坝水电站泄水坝段挠曲核部破碎带补强灌浆固孔止水施工阶段,选取代表性施工孔段,按照常规浆液配方和改性浆液配方,现场制成浆液,采用“自上而下,钻灌一体,间隔灌浆”施工工艺进行现场对比性生产试验。生产试验过程中,通过现场取样试验,对比研究分析浆液的稳定性、可灌性、固壁性、泌水性、初凝时间、结石体强度等,为后期浆液选择与优化提供技术支撑。2 种浆液在向家坝水电站泄 9 坝段现场搅拌配制,双层搅拌桶内随机取样。对于浆液稳定性的对比研究,本次试验主要结合工艺需要,选取析水率和凝固时间作为研究指标。

2 试验仪器及试验方法

2.1 试验仪器

试验仪器包括:比重称、漏斗粘度计、秒表、100 mL 量筒、维卡仪、岩石抗压强度试验机等^[9]。

2.2 试验方法

2.2.1 水泥浆密度检测

水泥浆密度检测采用比重称法。将水泥浆注入比重称的泥浆杯中,齐平杯口,不留气泡。然后把杠杆的主刀口放到底座的主刀垫上,将砝码缓缓移动,当水泡位于中央时,杠杆呈水平状态,砝码左侧所示刻度,即为水泥浆密度。水泥浆密度检测应连续进行 2 次,取平均值。

2.2.2 水泥浆粘度检测

水泥浆液粘度检测采用漏斗粘度计。测量前,用清水校正漏斗粘度计。标准漏斗粘度计注满 700 mL 清水,流满 500 mL 量杯的时间为 15 s,误差应控制在 ± 0.5 s 以内^[10-11]。如误差超过 ± 0.5 s 应按下式校正或更换漏斗:

$$\text{泥浆的实际粘度}(s) = \frac{15 \times \text{测量的泥浆粘度}(s)}{\text{测量的清水粘度}(s)}$$

粘度计使用前应用水湿润,然后安装在仪器架上,装好筛网,并将 500 mL 的敞口量杯平置于粘度计下方。用左手食指堵住仪器的出液管,向漏斗中注入水泥浆至标识的刻度线,迅速放开食指,同时启动秒表计时。当流入量杯中的水泥浆恰好为 500 mL 时,停止计时,秒表示值(T)即为水泥浆粘度。水泥浆粘度检测应连续进行 2 次,取平均值。

2.2.3 水泥浆析水率检测

将水泥浆液倒入内径 27 mm、最大标准刻度 100 mL 的圆柱量筒中,液面位于 100 mL 刻度处。静置一定时间后,读取量筒中清水段的毫升数 d ,求出 d 占浆液总体积(100 mL)的百分比,即为浆液的析水率。水泥浆析水率检测应连续进行 2 次,取平均值^[12-13]。

2.2.4 水泥浆初、终凝时间检测

检测时取出注满水泥浆的圆模放到维卡仪的试针下,使试针与净浆面接触,拧紧螺丝 1~2 s 后突然放松,试针垂直自由沉入净浆,观察试针停止下沉时指针读数。当试针沉至距底板 3~5 mm 时,即为水泥达到初凝状态;当下沉不超过 1~0.5 mm 时为水泥达到终凝状态。由水泥全部加入水中至初凝状态、终凝状态的时间分别为该水泥的初凝时间和终

凝时间,用小时(h)和分钟(min)来表示。检测时应注意,在最初检测的操作时应轻轻扶持金属棒,使其徐徐下降以防试针撞弯,但结果以自由下落为准,在整个测试过程中试针贯入的位置至少要距圆模内壁 10 mm。临近初凝时,每隔 5 min 检测一次,临近终凝时每隔 15 min 检测一次,到达初凝或终凝状态时应立即重复测一次,当 2 次结果相同时才能定为到达初凝或终凝状态^[14]。每次检测不得让试针落入原针孔,整个检测过程中要防止圆模受振^[15]。

2.2.5 抗压强度检测

试件尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的正方体,分 3 d 抗压强度和 28 d 抗压强度每组取 3 个样。采用试验室标准养护,达到相应龄期后进行无侧限单轴抗压强度试验^[16]。

2.3 试验设计

选取向家坝水电站泄 9 坝段 X9-GC-2B-02、X9-GC-2B-12 两孔采用改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液进行固孔止水灌浆,X9-GC-2B-03、X9-GC-2B-11 两孔采用掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液进行固孔止水灌浆。2 种浆液的灌浆效果分 2 组进行对比试验,其中第一组为 X9-GC-2B-02 号孔与 X9-GC-2B-03 号孔,第二组为 X9-GC-2B-12 号孔与 X9-GC-2B-11 号孔。

3 对比试验成果分析

3.1 浆液密度分析

第一组浆液试验密度对比详见图 1,第二组浆液试验密度对比详见图 2。从图 1 和图 2 可以看出,两种浆液在使用时间内密度比较稳定,受浆液析水率和孔内涌水等影响,存在小幅波动,基本保持在 1.55~1.65 g/cm³之间。

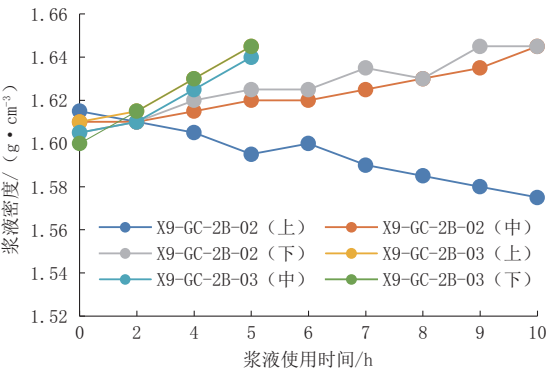


图 1 第一组浆液试验密度曲线

Fig.1 Density curves of the first group of testing grout

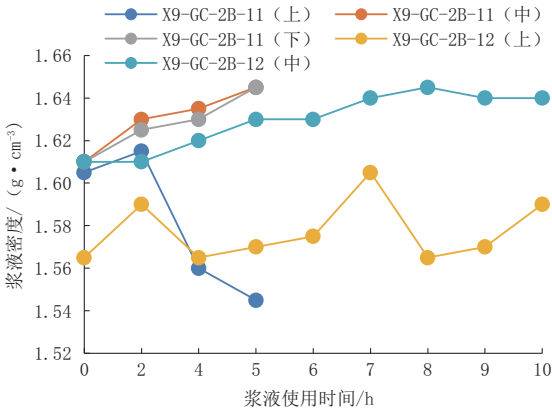


图 2 第二组浆液试验密度曲线

Fig.2 Density curves of the second group of testing grout

3.2 浆液析水率分析

第一组浆液试验析水率对比详见图 3,第二组浆液试验析水率对比详见图 4。

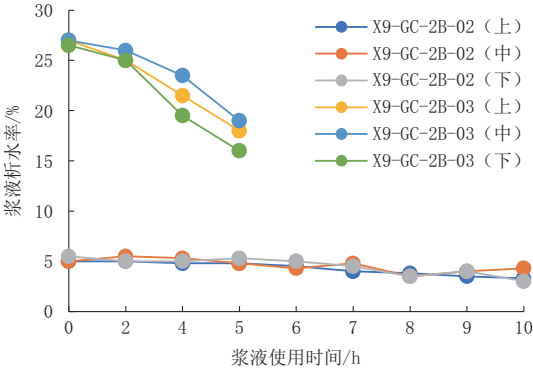


图 3 第一组浆液试验析水率曲线

Fig.3 Water separation rate curves of the first group of testing grout

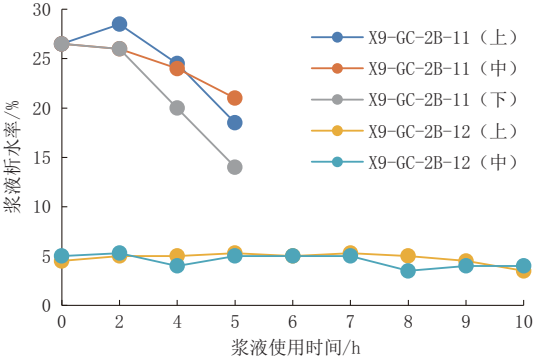


图 4 第二组浆液试验析水率曲线

Fig.4 Water separation rate curves of the second group of testing grout

从图 3 和图 4 可知,掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液析水率随使用时间的延长递减较明显,2 h 析水率>25%。改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液在使用时间内析水率基本保持在 5%左右,具有良好的抗泌水性能,可避免可灌性较差岩体“吃水不吃浆”灌入量假象。

3.3 浆液粘度分析

第一组浆液试验粘度对比详见图 5,第二组浆液试验粘度对比详见图 6。

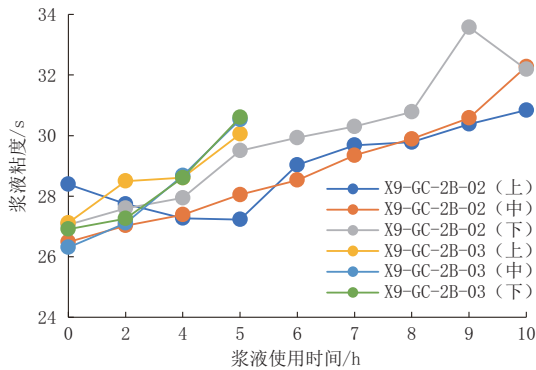


图 5 第一组浆液试验粘度曲线

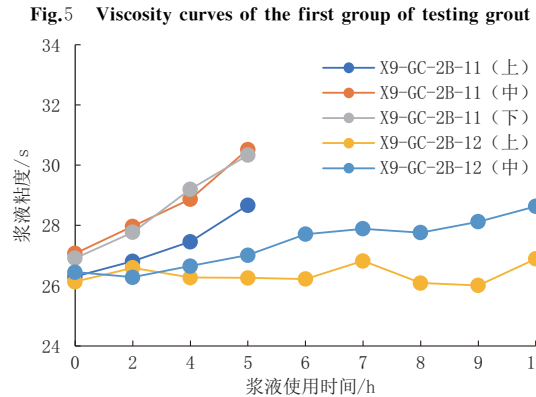


图 6 第二组浆液试验粘度曲线

从图 5 和图 6 可以看出,两种浆液随着使用时间的延长,粘度有缓慢增大的趋势,整体范围在 26~34 s。

3.4 浆液初终凝时间分析

第一组浆液试验初凝时间对比详见图 7,第二组浆液试验初凝时间对比详见图 8,第一组浆液试验终凝时间对比详见图 9,第二组浆液试验终凝时间对比详见图 10。

从图 7~图 10 可知,掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液初凝时间为 12~14 h,终凝时间为 21~23 h,两者相差约 9 h。改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液初凝时间为 26~28 h,终凝时间为 29~31 h,两者相差仅 3 h。这是因为改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液添加了六偏磷酸钠^[8],可延长初凝时间,但从初凝到终凝时间间隔却不长,这样就大大延长了浆液的使用时间。

万方数据

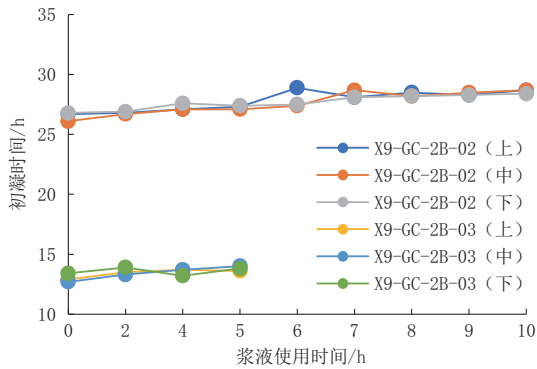


图 7 第一组浆液试验初凝时间曲线

Fig.7 Initial setting time curves of the first group of testing grout

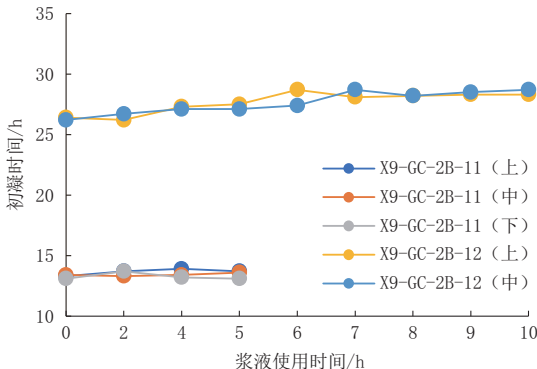


图 8 第二组浆液试验初凝时间曲线

Fig.8 Initial setting time curves of the second group of testing grout

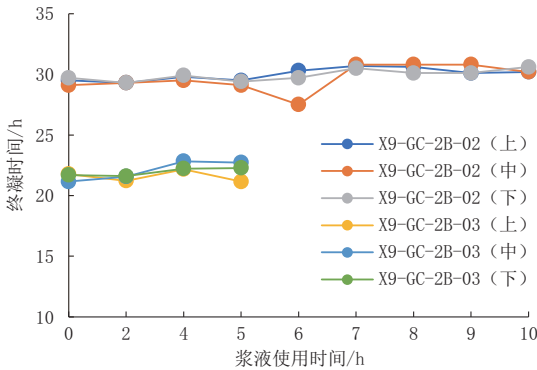


图 9 第一组浆液试验终凝时间曲线

Fig.9 Final setting time curves of the first group of testing grout

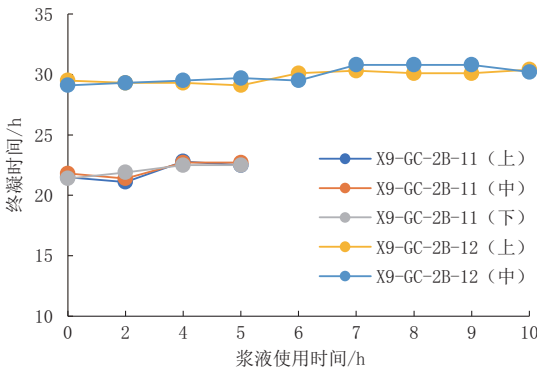


图 10 第二组浆液试验终凝时间曲线

Fig.10 Final setting time curves of the second group of testing grout

3.5 浆液结石体强度分析

第一组浆液试验 3 d 抗压强度对比详见图 11, 第二组浆液试验 3 d 抗压强度对比详见图 12, 第一组浆液试验 28 d 抗压强度对比详见图 13, 第二组浆液试验 28 d 抗压强度对比详见图 14。

从图 11~图 14 可知,两种浆液随着使用时间的延长,抗压强度下降趋势较明显。掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液新浆取样 3 d 抗压强度

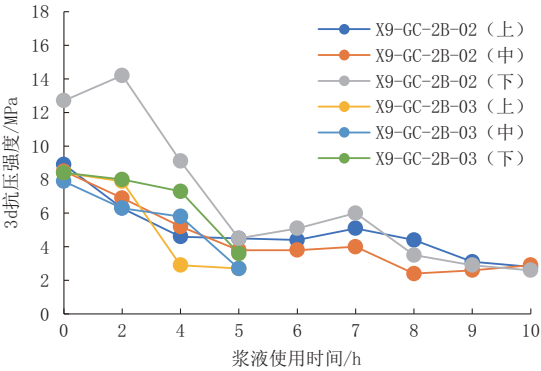


图 11 第一组浆液试验 3 d 抗压强度曲线
Fig.11 3d compressive strength curves of the first group of testing grout

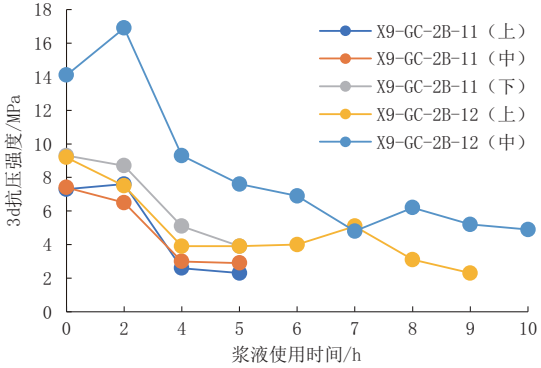


图 12 第二组浆液试验 3 d 抗压强度曲线
Fig.12 3d compressive strength curves of the second group of testing grout

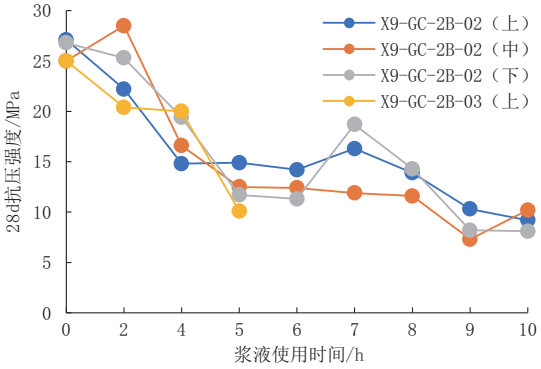


图 13 第一组浆液试验 28 d 抗压强度曲线
Fig.13 28d compressive strength curves of the first group of testing grout

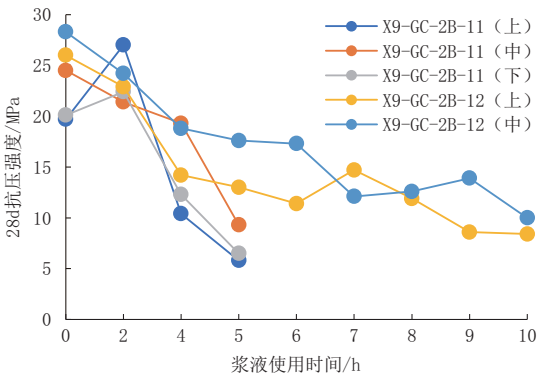


图 14 第二组浆液试验 28 d 抗压强度曲线
Fig.14 28d compressive strength curves of the second group of testing grout

为 7.3~9.3 MPa, 28 d 抗压强度为 19.7~25.0 MPa;浆液使用 5 h 取样 3 d 抗压强度为 2.3~3.9 MPa,下降率 58%~68%, 28d 抗压强度为 5.8~10.1 MPa,下降率 60%~71%。改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液新浆取样 3 d 抗压强度为 8.5~14.1 MPa, 28 d 抗压强度为 25.0~28.3 MPa;浆液使用 5 h 取样 3 d 抗压强度为 3.8~7.6 MPa,下降率 46%~55%, 28 d 抗压强度为 11.7~17.6 MPa,下降率 38%~53%。浆液使用 10 h 取样 3 d 抗压强度为 2.6~4.9 MPa,下降率 65%~69%。28 d 抗压强度为 8.1~10.2 MPa,下降率 64%~68%。由此可见,无论是 3 d 抗压强度,还是 28 d 抗压强度,改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液明显高于掺加缓凝型减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液,且有早强作用。

4 结论

通过浆液性能现场试验对比研究与分析,可以得出以下结论:

- (1)改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液稳定性、可灌性、固壁性、初凝时间、结石体强度等性能指标,完全满足向家坝水电站坝基绕曲核部破碎带防渗补强灌浆固孔止水阶段工艺浆液性能的要求。
- (2)改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液采用六偏磷酸钠替代缓凝型高效减水剂作为缓凝剂与分散剂,较好地解决了缓凝型高效减水剂型高抗硫酸盐水泥浆液稳定性差、灌浆泌水、固孔止水效果差、后期浆液结石体强度低等技术问题。
- (3)改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液在灌浆有效可操作时间内,根据浆液不同使用时段取样检测成果分析,无论是浆液稳定性、浆液粘度、浆液泌水性,

以及浆液结石体强度指标,均明显优于掺加缓凝型高效减水剂的高抗硫酸盐水泥浆液。

(4)改性高抗硫酸盐水泥稳定浆液进行灌浆施工时,建议浆液可使用时间延长至 8~10 h。

参考文献(References):

- [1] 舒王强,朱华周,陈安重,等.承压渗流条件下不良地质体灌浆技术研究与应用[J].西北水电,2017(4):63—67.
SHU Wangqiang, ZHU Huazhou, CHEN Anzhong, et al. Study and application of grouting technology for unfavorable geological body under condition of confined seepage flow[J]. Northwest Hydropower, 2017(4):63—67.
- [2] 向浩天,蒋炳,李之军,等.外加剂对低温水泥浆性能的影响试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):36—42.
XIANG Haotian, JIANG Bing, LI Zhijun, et al. Study on effect of additives on cement slurry at low temperature[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):36—42.
- [3] 王晋伟,周若如,杨鑫,等.盐渍土地区水泥基浆液最优配比及早期耐腐蚀性研究[J].建筑科学,2017(5):55—60.
WANG Jinwei, ZHOU Mingru, YANG Xin, et al. Study on the optimal proportion and early corrosion resistance of cement-based grout in saline soil area[J]. Building Science, 2017(5):55—60.
- [4] 刘孔凡,焦莉莉.普通水泥稳定浆液研究[J].水利水电技术,2012,43(3):38—41.
LIU Kongfan, JIAO Lili. Study on ordinary cement stabilized grout[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2012,43(3):38—41.
- [5] 宋雪飞,王正胜,苏建国,等.煤层底板加固中的粘土水泥浆液配方设计[C]//矿山建设工程技术新进展——2008 全国矿山建设学术会议论文集(上),2008:391—395.
SONG Xuefei, WANG Zhengsheng, SU Jianguo, et al. Composition design of clay cement slurry in coal-seam bedplate consolidation[C]//New Progress in Mine Construction Engineering Technology—Proceedings of 2008 National Conference on Mine Construction (I), 2008:391—395.
- [6] 陈律,胡福洪,胡刚.武汉地区粉煤灰和膨润土双掺合剂水泥土性能改良试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):62—67.
CHEN Lü, HU Fuhong, HU Gang. Experiment on performance improvement of cement-soil with the dual admixture of fly ash and bentonite in Wuhan area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):62—67.
- [7] 赵跃奇,彭振斌,陈安重,等.高抗硫酸盐水泥稳定浆液研究与应用[J].水资源与水利工程学报,2014,25(6):176—178,183.
ZHAO Yueqi, PENG Zhenbin, CHEN Anzhong, et al. Re-

search and application of stable slurry of high sulfate resistant cement[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014,25(6):176—178,183.

- [8] 黄辉,伍远鹏.两河口水电站初期导流洞固结灌浆试验施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):81—84.
HUANG Hui, WU Yuanpeng. Construction technology of consolidation grouting test of initial diversion tunnel in Lianghekou Hydropower Station[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(5):81—84.
- [9] 赵跃奇.水泥稳定浆液及抗腐蚀研究[J].土工基础,2016,30(6):688—690.
ZHAO Yueqi. Study and application of the cement stabilizer and its corrosion resistance property[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016,30(6):688—690.
- [10] 聂琼.矿渣微粉新型注浆材料的开发试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2010.
NIE Qiong. Development and test research of new grouting materials on slag powder[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010.
- [11] 张飞,刘杰,方尚伟,等.黏土水泥系列浆材黏度时变特性研究[J].人民长江,2018(19):94—99.
ZHANG Fei, LIU Jie, FANG Shangwei, et al. Study on time-varying viscosity of clay cement series slurry[J]. Yangtze River, 2018(19):94—99.
- [12] 李相辉,张庆松,张霄,等.水泥浆析水性能试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(1):8—14.
LI Xianghui, ZHANG Qingsong, ZHANG Xiao, et al. Experimental study on water separation performance of cement slurry[J]. Journal of Building Materials, 2018,21(1):8—14.
- [13] 唐应鹏.关于水泥浆材试验相关问题的探讨[J].四川水泥,2018(9):22,13.
TANG Yingpeng. Discussion on the test of cement slurry[J]. Sichuan Cement, 2018(9):22,13.
- [14] GB/T 1346—2011,水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法[S].
GB/T 1346—2011, Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the part-land[S].
- [15] 侯利.提高水泥检测质量的控制措施研究[J].城市建设理论研究:电子版,2012(36):1—5.
HOU Li. Research on control measures to improve cement inspection quality[J]. Urban Construction Theory Research (Electronic Edition), 2012(36):1—5.
- [16] JGJ/T 70—2009,建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].
JGJ/T 70—2009, Standard for the test method of performance building mortar[S].

(编辑 周红军)