

低热水泥在天台抽水蓄能电站面板混凝土中的应用研究

鹿永久¹, 邓超¹, 吴申瑜²

1. 长江三峡技术经济发展有限公司, 湖北 宜昌 443133

2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 江苏 南京 211103

DOI:10.61369/ETQM.2025120012

摘要: 本文详细阐述了低热水泥在天台抽水蓄能电站面板混凝土中的应用。通过对工程概况和研究背景的介绍, 分析低热水泥相较于普硅水泥在抗裂性能等方面的优势, 详细说明低热水泥面板混凝土施工工艺, 展示实施效果并进行经济性分析。研究表明, 低热水泥在该电站面板混凝土中的应用有效提升了混凝土性能, 避免了裂缝产生, 具有良好的经济效益和工程应用价值, 可为同类工程提供参考借鉴。

关键词: 低热水泥; 天台抽水蓄能电站; 面板混凝土; 抗裂性能

Research on The Application of Low-heat Cement in The Concrete Slab of Tiantai Pumped Storage Power Station

Lu Yongjiu¹, Deng Chao¹, Wu Shenyu²

1. Yangtze Three Gorges Technology & Economy Development Co., Ltd., Yichang, Hubei 443133

2. Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103

Abstract: This paper elaborates in detail on the application of low-heat cement in the concrete slab of the Tiantai Pumped Storage Power Station. By introducing the project overview and research background, it analyzes the advantages of low-heat cement over ordinary Portland cement in terms of crack resistance and other aspects. The construction process of low-heat cement concrete slabs is described in detail, and the implementation effects are demonstrated alongside an economic analysis. The study shows that the application of low-heat cement in the concrete slabs of this power station effectively enhances concrete performance, prevents cracking, and offers good economic benefits and engineering application value, providing a reference for similar projects.

Keywords: low-heat cement; tiantai pumped storage power station; concrete slab; crack resistance

引言

天台抽水蓄能电站是国家《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》“十四五”重点实施项目, 位于台州市天台县。天台抽水蓄能电站装机容量170万千瓦, 单机容量42.5万千瓦为国内抽水蓄能电站最大, 额定水头724米, 为世界最高, 上下引水斜井长度达483.4米。电站主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房和开关站等组成。其中, 下水库大坝采用混凝土面板堆石坝, 坝顶高程206.50m, 最大坝高71.0m, 坝顶长420m, 坝顶宽度8米。大坝面板采用二级配常态混凝土C30W10F150 共计17360m³, 面板直接承受上游水头压力, 是大坝主要防渗结构, 总面积约3.6万平方米, 划分为35块, 采用滑模浇筑, 单块宽度12米, 最大斜长116.5米, 面板厚度为: $T=0.40 \sim 0.603m$ [厚 $0.40+0.003H(m)$] (H 为计算断面至面板顶部的高度), 大坝上游填筑后坝坡1:1.4, 面板施工后坝坡1:1.405, 面板内布置双层双向钢筋。

混凝土面板是混凝土面板堆石坝的防渗主体, 满足混凝土的抗裂性是其主要需求。从国内外已建和在建混凝土面板堆石坝工程实践来看, 面板混凝土裂缝的产生和延展不但严重影响混凝土结构本身的耐久性, 并且其导致的渗漏问题还对大坝主体长期服役性十分不利。如何避免混凝土面板产生裂缝、提高混凝土面板的耐久性, 是此类面板混凝土亟待解决的关键问题之一。随着我国抽水蓄能电站建设的快速发展, 对大坝面板混凝土的性能要求越来越高。混凝土裂缝问题一直是困扰水工建筑物耐久性和安全性的关键因素。在已建的抽水蓄能电站混凝土中, 普遍采用普通硅酸盐水泥。普硅水泥水化快、水化热高, 温度收缩大, 同时自干燥收缩也大, 更容易引发裂缝。相对普硅水泥而言, 低热水泥的主要矿物成分中硅酸二钙含量较高, 不小于40%, 具有低水化热、放热速率慢、干缩小、高后期强度及后期强度增进率高、热强比低、抗侵蚀、抗磨性和抗裂性能良好等特点, 对提高大体积混凝土工程的抗裂性和耐久性具有显著的作

作者简介: 鹿永久(1973.12—), 男, 高级工程师, 研究方向: 建筑材料及混凝土试验研究工作。

用^[1]。与传统的中热水泥及普热水泥相比,应用于大坝混凝土中,可使混凝土绝热温升降低8℃~10℃,能有效减小混凝土内部与表面的温差,降低温度应力,从而减小裂缝产生的可能性^[2]。为解决高水头作用下混凝土面板抗裂、抗渗方面的问题,通过面板混凝土抗裂性能专项研究,借鉴类似工程建设经验,引入了低热硅酸盐水泥(以下简称“低热水泥”),并进行了一系列的研究和实践应用。

一、低热水泥面板混凝土配合比设计

(一) 混凝土原材料优选

采用普通硅酸盐P·O42.5水泥、嘉华特种水泥(兰溪)有限公司生产的低热硅酸盐水泥P·LH42.5两种水泥、华能南京金陵发电有限公司的F类I级粉煤灰、项目中转料场系统生产的人工粗、细骨料;江苏苏博特新材料股份有限公司提供的PCA-I高性能减水剂、GYQ-I高效引气剂,以及不同类型的混凝土膨胀剂(抗裂剂)和改性PVA纤维与玄武岩纤维开展面板混凝土抗裂性能对比试验研究,开展了不同原材料混凝土性能对比试验研究和抗裂性研究,研究结果表明,混凝土用原材料性能满足设计技术和规程规范要求,改性PVA纤维混凝土拌和物中分散性较好,混凝土拌和物性能、混凝土力学性能和耐久性能满足设计技术要求。混凝土拌和物性能较好,力学性能和变形性均有所提高,混凝土抗裂性能最佳。



改性 PVA 纤维分散性试验

(二) 配合比施工配合比

天台抽水蓄能电站面板混凝土属于典型的薄壁结构混凝土,在满足施工性能要求下,重点考虑其抗压强度、极限拉伸值及抗裂性能,同时兼顾抗冻、抗渗等耐久性能。通过对比试验研究,最终选择“低热水泥+F类I级粉煤灰+改性PVA纤维”的胶材体系作为面板混凝土施工配合比进行施工,其混凝土施工配合比见表1。

表1 施工配合比表

设计指标	坍落度(mm)	级配	水胶比	粉煤灰掺(%)	砂率(%)	混凝土材料用量(kg/m ³)								
						水泥	粉煤灰	水	砂	小石	中石	减水剂	引气剂	PVA
C30W10F150	30~50	二	0.40	25	37	224	81	130	712	545	667	2.925	0.016	1.0
	50~70	二	0.40	25	37	253	84	135	703	538	658	3.370	0.017	1.0

二、施工工艺

(一) 混凝土制备

1. 原材料的准备

水泥:控制水泥入仓温度在65℃以下,增大储备量,延长周转时间,降低拌合时水泥的温度。

粉煤灰:把控粉煤灰的品质,加大进场批量,确保质量稳定。

细骨料:增大料场堆放量,延长沥水时间,砂子含水率控制在4%以内。

2. 投料顺序与拌合制度

搅拌过程中,严格控制原材料的计量精度,确保各种材料按照配合比准确称量。按照骨料+纤维+胶材+水→外加剂投料顺序,搅拌时间不少于2min,以保证混凝土搅拌均匀,工作性能稳定。增加砂子含水率测试频次,根据含水率波动及时调整配料配合比。

(二) 混凝土运输

混凝土采用4m³自卸车运输,每套滑模配3~4辆自卸车进行水平运输,运输过程中避免发生骨料分离、漏浆和严重泌水等现象,采取遮阳、保湿措施,防止混凝土水分蒸发和温度升高。根据气温情况、溜槽长度动态调整混凝土出机口坍落度,当气温较

高、溜槽长度较长时适当增加出机口坍落度,并根据施工经验确定其具体数值,以满足混凝土溜送及入仓口坍落度30~50mm要求。

(三) 混凝土浇筑

优化面板浇筑方案。面板混凝土采用无轨滑模跳仓浇筑,溜槽入仓,每块面板开仓后连续滑升到顶。控制面板混凝土拉模速度,根据不同的气候条件一般控制在2~3m/h为宜。为防止早期面板表面出现裂缝,在混凝土初凝前采用二次压面工艺。部分溜槽采用遮阳布进行分段封闭,以减小混凝土溜送过程中的坍落度损失。

(四) 混凝土养护

养护是保证混凝土面板质量的关键,混凝土脱模后立即覆盖土工布防止表面失水,当强度增长到不因水冲而损坏时开始洒水养护,保持表面湿润。混凝土浇筑开始,认真做好面板的保温、保湿的养护工作以减少环境条件引起混凝土的干缩和温缩,混凝土养护至大坝蓄水。

三、低热水泥混凝土施工实施的效果

(一) 裂缝控制效果

通过在天台抽水蓄能电站面板混凝土中应用低热水泥,并采取优化的配合比和施工工艺,面板混凝土的裂缝得到了有效控

制。在面板施工完成后的质量检查中,仅发现22条细微裂缝,裂缝宽度均小于0.2mm,远低于设计允许的裂缝宽度标准(裂缝宽度 δ 不大于0.5mm),满足了大坝防渗和结构安全的要求。与采用普硅水泥的类似工程相比,裂缝数量和宽度都显著减小,有效提高了面板混凝土的抗裂性能。

(二) 强度发展情况

对面板混凝土进行强度检测,结果表明,虽然低热水泥混凝土早期强度发展较慢,但28d强度基本达到了设计强度等级,56d和90d强度均有较大幅度增长^[3](如图1),满足工程长期运行对强度的要求。通过现场钻芯取样进行抗压强度试验,各龄期强度试验结果均符合设计预期,保证了面板结构的稳定性。

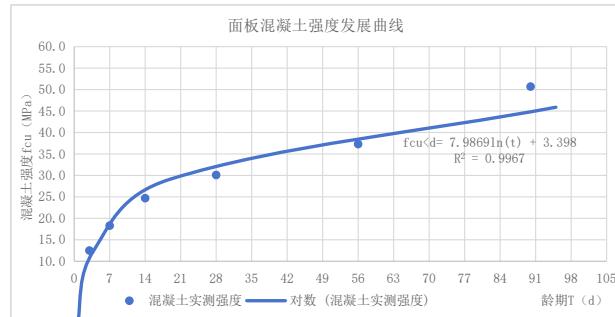


图1 面板混凝土强度发展曲线图

(三) 耐久性评估

通过对面板混凝土进行抗渗性、抗冻性等耐久性指标检测,结果显示,混凝土的耐久性良好。抗渗等级达到了W10以上,抗冻等级达到了F200以上,满足抽水蓄能电站面板混凝土在恶劣环境下长期运行的耐久性要求。这得益于低热水泥的高耐久性和抗侵蚀性能以及合理的配合比设计和施工工艺。

四、经济性分析

(一) 材料成本

低热水泥的生产成本相对较高,其单价比普硅水泥约高出20~30%。然而,由于低热水泥混凝土具有良好的抗裂性能,减少了因裂缝处理而产生的额外费用,如修补材料费用、人工费用等,每方低热水泥混凝土生产成本较普硅水泥混凝土生产成本高25元左右。同时,低热水泥混凝土的耐久性提高,可减少后期维

护和修复的成本,所估算每平方低热水泥混凝土维修成本仅普硅水泥混凝土的1%~3%,从长期来看,综合成本可能并不高于普硅水泥混凝土。此外,低热水泥更高的后期强度增长率和更低的标准稠度用水量,在配合比设计上,较普硅降低了用水量和胶材用量,一定程度上降低胶材成本。

(二) 施工成本

在施工过程中,由于低热水泥混凝土的工作性能良好,便于施工操作,如滑模施工过程中,混凝土的流动性和可塑性满足施工要求,减少了施工难度和施工时间。同时,由于裂缝控制效果好,减少了因裂缝处理而导致的施工延误,提高了施工效率,降低了施工成本。另外,低热水泥的应用降低了温控的成本。

(三) 全寿命周期成本

从全寿命周期成本角度分析,虽然低热水泥在初期的材料成本可能略有增加,但考虑到其对混凝土结构耐久性的提升,可有效延长电站面板的使用寿命,减少后期维护和更换的费用。根据相关研究和工程经验估算,采用低热水泥的面板混凝土全寿命周期成本相较于普硅水泥可降低30~35%,具有较好的经济效益。

五、结论与展望

通过在天台抽水蓄能电站面板混凝土中应用低热水泥的实践研究,得出以下结论:低热水泥具有低水化热、高后期强度、低收缩率、高耐久性和抗侵蚀性能等优点,与普硅水泥相比,在抗裂性能方面具有显著优势;通过合理的配合比设计和优化的施工工艺,低热水泥面板混凝土能够满足工程的各项性能要求,有效控制裂缝产生,提高面板的质量和耐久性;从经济性分析来看,低热水泥虽然初期成本略有增加,但在全寿命周期内具有较好的经济效益。低热水泥在天台抽水蓄能电站面板混凝土中的成功应用,为其他抽水蓄能电站及水工建筑物的混凝土施工提供了宝贵的经验和参考。未来,随着对低热水泥研究的不断深入和技术的不断进步,低热水泥的性能将进一步优化,成本有望降低,其在水工领域的应用前景将更加广阔。同时,还需要进一步研究低热水泥与其他新材料、新技术的结合应用,以不断提高水工混凝土的性能和工程质量。

参考文献

- [1] 马忠诚,姚燕,文寨军,等.低热硅酸盐水泥的研究进展[J].新型建筑材料,2019(1):1-5.
- [2] 汪志林,陈文夫,孙明伦.白鹤滩水电站低热硅酸盐水泥应用[M].中国水利水电出版社,2025.
- [3] 钟跃辉,武亮,刘春风,等.低热水泥混凝土早龄期强度试验与成熟度分析[J].人民长江,2021,52(9):186-192.