

平陆运河企石枢纽工程混凝土预冷系统设计及应用

吴凤亮¹, 黄涛¹, 郭丽莉², 高小东¹, 王喜才¹

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 平陆运河是广西内河水运规划中重要的出海通道, 航道建设中船闸和泄水闸等部位以大体积混凝土为主, 实际施工中因温度控制不当, 大体积混凝土很容易产生温度裂缝, 应利用有效的温控技术预防大体积混凝土裂缝问题的出现。文章以平陆运河企石枢纽工程预冷混凝土生产系统为例, 针对预冷混凝土出机口 16 °C 的温度控制要求, 结合项目实际情况, 从预冷方案比选、设备配置两方面进行研究, 最终采取“骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨料仓风冷粗骨料”的预冷措施, 实现预冷混凝土出机口温控要求的目的。经实践能够较好满足生产需求, 可供类似水运工程参考借鉴。

关键词: 预冷混凝土; 平陆运河; 制冷楼

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)04-0098-05

doi: 10.7640/zggwjs202504016

Design and application of concrete precooling system for Pinglu Canal Qishi Hub Project

WU Feng-liang¹, HUANG Tao¹, GUO Li-li², GAO Xiao-dong¹, WANG Xi-cai¹

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;

2. Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Pinglu canal is an important channel for navigation in the planning of inland river transportation in Guangxi. In the course of waterway construction, the lock and sluice are mainly made of mass concrete. Due to improper temperature control in actual construction, mass concrete is easy to produce temperature cracks. Effective temperature control technology should be used to prevent mass concrete cracks. Taking the pre-cooled concrete production system of Pinglu Canal Qishi Hub Project as an example, according to the temperature control requirements of 16 °C at the pre-cooling concrete outlet, the study was carried out from two aspects of pre-cooling scheme comparison and equipment configuration combined with the actual conditions of the project. Finally, the pre-cooling measures of "Air-cooled aggregate yard cooling + cold water mixing + ice chips mixing + Air-cooled coarse aggregate in mixing plant aggregate bin" were adopted to realize the temperature control requirements of pre-cooled concrete outlet. The practice can better meet the production demand, which can be used as a reference for similar water transport projects.

Key words: pre-cooled concrete; Pinglu Canal; refrigeration plant

0 引言

大体积混凝土水工结构如大坝、船闸、泄洪建筑物、电站厂房等, 体积大, 结构形式复杂^[1]。平陆运河企石枢纽工程混凝土以大体积混凝土为

主, 混凝土在浇筑过程中, 胶凝材料水化热导致混凝土内部温度急剧上升。大体积混凝土自然散热缓慢, 内外温变差产生温度应力。为防止混凝土因温度应力产生裂缝, 混凝土内部最高温度须

加以严格限制。限制混凝土最高温度最有效的方法之一就是混凝土预冷, 降低混凝土的出机口温度, 从而降低其入仓温度^[2], 即绝热温升的起点温度, 达到降低混凝土升温过程中温度峰值的目的。在气温较高的季节, 混凝土在自然条件下的出机口温度往往超过施工所要求的限度, 此时就必须采取人工降温措施, 使用预冷却材料拌制混凝土降低出机口温度^[3]。

预冷混凝土出机口温度控制措施是自长江三峡水利枢纽工程以来不断发展和日趋成熟的技术^[4], 混凝土的预冷措施在工程中的应用主要有风冷粗骨料、水冷粗骨料、砂料预冷、加冰拌和、冷水拌和等, 本项目预冷混凝土出机口温控要求为 16℃, 在水运工程中对同类型工程, 温控要求更高, 如何结合当地气候条件从而选择经济有效的温控措施, 并通过合理的设备选型配置实现本项目预冷混凝土出机口温控要求是本文研究的重点。

1 工程概况

西部陆海新通道平陆运河企石枢纽工程位于钦州市陆屋镇上游 5.5 km 处, 枢纽总长 3 km, 从左至右分别为: 左岸土坝、5 孔泄水闸、中部连接坝、双线三级省水船闸、右岸土坝及副坝。枢纽下游设置 1 座公路桥连接两岸交通。建设周期 1 350 d。工程地处亚热带气候区, 多年平均气温 21.8℃, 最热月份为 7 月, 平均气温 28~29℃, 极端最高气温为 38.8℃。

平陆运河企石枢纽工程混凝土总量 292 万 m³, 其中预冷混凝土总量 212 万 m³, 设 1 套混凝土拌和系统布置于枢纽右岸下游约 1.5 km 处。根据施工进度安排, 混凝土高峰期月度需求量达 20 万 m³, 设计生产能力 600 m³/h, 配置 2 座 HL360-2S7000 强制式搅拌楼和 2 座 HZ180-1Q4000 强制式搅拌站。预冷混凝土高峰期月度需求量达 16.5 万 m³, 设计生产能力 495 m³/h。预冷混凝土出机口温度要求 16℃, 浇筑温度 22~24℃。考虑在 2 座 HL360-2S7000 强制式搅拌楼中生产预冷混凝土, 每座楼按生产能力 250 m³/h 配置预冷设备。根据 NB/T 35005—2021《水电工程混凝土生产系统设计规范》^[5], 该混凝土生产系统为特大型混凝土生产系统。

工程混凝土典型配合比及原材料初始温度取值见表 1、表 2。

表 1 典型常态三级配混凝土配合比

Table 1 Typical normal three graded concrete mix ratio table

水泥	粉煤灰	砂	大石	中石	小石	外加剂	水
198	80	660	625	380	297	4.95	135

注: 表中数值除外加剂修约到两位小数外, 其余取整值。

表 2 7 月份混凝土原材料初始温度表

Table 2 Initial temperature table of concrete raw materials in July

水泥	粉煤灰	骨料	自然水	冷冻水
60	45	29	27	5

2 预冷措施分析

混凝土预冷方式主要包括风冷粗骨料、水冷粗骨料、砂料预冷、加冰拌和、冷水拌和等。预冷方式可采用前述一项或多项预冷措施组合使用。预冷措施与工程所在地的气温有关, 本项目工程所在地 7 月份多年平均气温 28~29℃, 要求预冷混凝土出机口温度 16℃, 预冷混凝土按最不利 7 月份为控制月。根据表 1、表 2 参数, 温控标准及设计条件, 对混凝土原料进行热平衡计算, 高温季节自然拌和混凝土出机口温度计算公式见式 (1)^[6]。

$$T_{0L} = \left(\sum_{i=1}^n G_i c_i T_i + \sum_{i=1}^n G_{gi} c_w \theta_i T_i + Q_j \right) / \sum_{i=1}^n (G_i c_i + G_{gi} c_w \theta_i) \quad (1)$$

式中: T_{0L} 为高温季节自然拌和混凝土出机口温度, ℃; G_i 为每 m³ 混凝土中第 i 种材料的质量, kg/m³; c_i 为第 i 种材料的比热容, kJ/(kg·℃); T_i 为每 m³ 混凝土中第 i 种材料的温度, ℃, 对采取预冷措施的材料, 取预冷后的温度; G_{gi} 为每 m³ 混凝土中第 i 种骨料的质量, kg/m³; c_w 为水的比热容, kJ/(kg·℃); θ_i 为每 m³ 混凝土中第 i 种骨料的表面含水率, %; Q_j 为每 m³ 混凝土拌和时的机械热, kJ/m³。

经过计算得出, 7 月份三级配自然拌和混凝土出机口温度 33℃, 要求出机口温度 16℃, 降温幅度为 17℃。参考 NB/T 11014—2022《水电工程混凝土预冷和预热系统设计规范》^[6] 常态混凝土常用冷却措施组合方式, 可采用的冷却措施有 3 种组合方式: 1) 方案一为骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨料仓风冷粗骨料; 2) 方案二为骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨料仓风冷粗骨料+骨料预冷仓风冷粗骨料; 3) 方案三为骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨

料仓风冷粗骨料+水冷粗骨料。

对比以上3种方案,在方案二中增加了骨料预冷仓风冷粗骨料,需设置骨料预冷仓,增加骨料转存环节,在有限的场地条件下,占地面积大,布置难度较大。骨料预冷仓至搅拌楼输送骨料的胶带机需保温,且上楼骨料需考虑1℃升温。对骨料仓吹冷风进行循环热交换,过程中存在漏风等情况,冷量损耗大,能耗大。制冷系统需分散布置,分设2处,骨料预冷仓旁需布置制冷设施。

方案三中增加了水冷粗骨料。水冷骨料在运行中脱水效果差;需要修建洒水廊道,制冷设施占地面积大;回收的制冷水含有大量泥沙,需建废水厂处理;水冷骨料含水率大,拌和加冰量受限制^[7]。

结合本工程场地布置、工艺流程等条件,确定本工程的预冷措施为“骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨料仓风冷粗骨料”。

3 混凝土预冷系统设计

3.1 预冷混凝土出机口温度计算

预冷混凝土按最不利7月份为控制月。根据表1—表2参数、温控标准及设计条件,对混凝土原料进行热平衡计算,预冷混凝土出机口温度计算公式见式(2)^[6]。

$$T_L = \left(\sum_{i=1}^n G_{ci} T_i + \sum_{i=1}^n G_{gi} c_w \theta_i T_i - 335 \eta_b G_b + Q_j \right) / \sum_{i=1}^n (G_{ci} + G_{gi} c_w \theta_i) \quad (2)$$

式中: T_L 为预冷混凝土出机口温度,℃; η_b 为冰的冷量利用率; G_b 为每 m^3 混凝土的加冰量, kg/m^3 。

3.2 冷水拌和、加冰拌和冷负荷

通过热平衡计算,生产每 m^3 混凝土需加48 kg片冰,5℃冷水拌和,可满足混凝土出机口温度16℃的要求。冷却拌和用水冷负荷计算公式见式(3)^[6],制冰冷负荷计算公式见式(4)^[6]。

$$Q_{wL} = 0.278 \times 10^{-3} k_{wL} Q_L G_{wL} c_w (t_{wJ} - t_{wC}) \quad (3)$$

$$Q_B = 0.287 \times 10^{-3} k_B G_B [c_w (t_{BW} - 0) + c_B (0 - t_B) + 335] \quad (4)$$

式中: Q_{wL} 为冷却拌和用水冷负荷, kW; k_{wL} 为拌和冷水冷量损耗及裕度系数,取1.1~1.2; Q_L 为预冷混凝土设计生产能力, m^3/h ; G_{wL} 为每 m^3 混凝土可加拌和冷水量, kg/m^3 ; t_{wJ} 为冷水生产设备的进水温度,℃; t_{wC} 为冷水生产设备的出水温度,℃; Q_B 为制冰冷负荷, kW; k_B 为制冰冷量损

耗及裕度系数,取1.20~1.25; G_B 为制冰能力, t/h; c_w 为制冰用水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; t_{BW} 为制冰用水水温,℃; c_B 为冰的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; t_B 为冰的温度,℃。

经计算, $Q_{wL} \approx 645$ kW。制冰冷负荷 $Q_B \approx 1\,467$ kW。

3.3 风冷冷负荷

通过热平衡计算,在搅拌楼料仓中将大石、中石、小石均从29℃降温到11℃,可满足混凝土出机口温度16℃的要求。利用仿真软件“混凝土骨料温控计算软件”^[8]对骨料风冷进行计算,包括冷负荷、冷风机面积、风量、料层风阻等,计算结果见表3。考虑设备负荷系数取1.2,按照单座楼生产能力250 m^3/h 配置设备,风冷冷负荷(设计工况)为2343×1.2≈2812 kW。

表3 骨料风冷计算表

Table 3 Air cooling calculation table for aggregate

序号	参数	搅拌楼骨料仓风冷粗骨料			
		小石	中石	大石(一仓)	大石(二仓)
1	冷却能力/($t \cdot h^{-1}$)	74	95	94	94
2	骨料初温/℃	29	29	29	29
3	骨料终温/℃	11	11	11	11
4	进风温度/℃	-5	-5	-5	-5
5	回风温度/℃	8	7	8	8
6	蒸发温度/℃	-15	-15	-15	-15
7	料仓截面积/ m^2	27.3	27.3	22.7	22.7
8	冷负荷/kW	486	623	617	617
9	冷风机面积/ m^2	1 923	2 530	2 476	2 476
10	风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	49 200	68 900	65 500	65 500
11	风速/($m \cdot s^{-1}$)	0.5	0.7	0.8	0.8
12	料层风阻/Pa	2 144	1 866	1 703	1 703
13	进回风高差/m	2.7	2.9	3.3	3.3

3.4 预冷系统设备配置

1) 骨料风冷系统

骨料风冷系统由集装箱式风冷模块、搅拌楼料仓、冷风机、冷风循环系统组成。搅拌楼风冷配备冷量(设计工况蒸发温度-16℃,冷凝温度40℃)2812 kW(单座楼)。

大石设2个仓进行风冷,选择1套集装箱式制冷主机AC2000EPC,配置4台压缩机,单台压缩机制冷量为504 kW,功率为224 kW,合计总制冷量2016 kW。中石和小石各设1个仓进行风冷,选择1套集装箱式制冷主机AC1650EPC,配

置 3 台压缩机, 单台压缩机制冷量为 550 kW, 功率为 261 kW, 合计总制冷量 1 650 kW。搅拌楼风冷骨料在搅拌楼料仓中进行。搅拌楼小石仓配备 1 台 2 000 m² 冷风机, 中石仓配备 1 台 2 800 m² 冷风机, 大石设 2 个仓, 均配备 1 台 2 500 m² 冷风机。

2) 制冰系统

搅拌楼制冰配备冷量(设计工况蒸发温度-22℃, 冷凝温度 40℃)1 467 kW(单座楼), 片冰的生产、贮存、输送在搅拌楼旁制冷楼中进行。

生产每 m³ 预冷混凝土需要冰量 48 kg, 每小时生产 250 m³ 混凝土, 每天按 20 h 计算, 则需要冰量为 240 t。选择 CF120 集装箱式制冰机 2 套, 单套集装箱式制冰机每天产冰量为 120 t, 可满足要求。高温时生产混凝土的加冰量高于制冰机产量时, 选择一套 AIS70 自动储冰库储存片冰进行补充。

3) 制冷水系统

搅拌楼制冷水配备冷量(设计工况蒸发温度 0℃, 冷凝温度 40℃)645 kW(单座楼)。按照每 m³ 预冷混凝土总加水量为 135 kg, 扣除砂石及骨料含水, 每 m³ 混凝土需加水量(含制冰用水)约为 80 kg。每座产量为 250 m³/h、每天工作 20 h 的搅拌楼预冷混凝土生产线, 每天生产所需冷水量为 400 t。每座搅拌楼配 1 套 480 t/d 型集装箱式冷水机组可满足要求, 进水温度 28℃、出水温度 4℃。

3.5 设备布置

每座搅拌楼旁设置 1 座制冷楼, 作为搅拌楼料仓风冷、制冰冷源、制冷水综合车间, 所有温控设备均放置在制冷楼内(空冷器及离心风机除外)。制冷楼长 15 m、宽 6 m、高约 33 m, 从下到上依次分层放置集装箱式冷水机、骨料风冷系统模块、送冰设备、自动储冰库、集装箱式制冰机。

风冷系统冷媒通过氟泵强制式循环向冷风机供液, 生产冷风。搅拌楼中每个料仓自上而下分为进料区、冷却区、贮料区。空气冷却器、离心鼓风机与各料仓一对一配置, 组成各自独立的冷风循环系统。

制冰系统制冰机生产的片冰直接进入设有隔热及降温措施的自动储冰库内, 片冰通过水平螺旋和耙冰机构进入胶带机输冰系统, 直接将片冰输送至搅拌楼称量器计量后卸入搅拌楼料斗内拌和混凝土。

制冷水系统中压缩机、蒸发冷等设备均布置在集装箱式冷水机组中, 冷水通过泵送方式运至搅拌楼料斗内拌和混凝土。

3.6 自控系统

制冷楼控制系统为 PLC 控制, 控制点主要有风冷集装箱模块、水冷集装箱模块、制冰集装箱模块及搅拌楼料仓进风口温度等, 系统的启停控制及运行、故障信号等通过硬接线或者串口通讯的方式上传到搅拌楼的控制柜, 制冷楼的连锁启停由搅拌楼根据运行工况统一协调控制。操作简单, 检测运行方便。

4 应用效果

截至 2024 年 3 月底, 平陆运河企石枢纽工程混凝土预冷系统运行期间的实测温度数据如表 4 所示。

表 4 实测温度数据表

Table 4 Measured temperature data sheet

时间		浇筑预冷 混凝土量/m ³	混凝土出 机口温度/℃	平均入仓 温度/℃	平均环境 温度/℃
2023 年	8 月	438.6	15.0	21.2	27.0
	9 月	676.0	14.5	18.7	25.0
	10 月	2 597.5	14.5	18.3	22.4
	11 月	6 388.0	13.9	17.3	18.9
	12 月	16 155.5	15.3	16.4	16.1
2024 年	1 月	28 240.5	12.4	19.6	19.2
	2 月	20 187.0	14.2	15.3	15.7
	3 月	1 311.0	14.5	19.3	21.4

根据表 4 实测温度数据显示, 平陆运河企石枢纽工程中混凝土预冷系统能满足 2023 年 8 月—2024 年 3 月持续 8 个月的预冷混凝土浇筑要求。

5 结语

平陆运河企石枢纽工程混凝土预冷系统设计, 以混凝土出机口温控要求为目标, 结合水运工程的特点, 充分考虑当地高温气候条件、场地条件限制, 从经济性、节能性、适用性方面综合比选确定采用“骨料堆场降温+冷水拌和+加冰拌和+搅拌楼骨料仓风冷粗骨料”的预冷措施。在设备选型和布置上考虑将风冷冷源、制冰、制冷水按集装箱模块形式供给, 集中布置在制冷楼中, 2 座搅拌楼各设 1 座制冷楼。经过应用效果良好, 可供类似水运工程参考借鉴。

参考文献:

- [1] 朱国春,隋金尊. 重庆嘉陵江草街航电枢纽工程混凝土预冷系统优化设计[J]. 中国港湾建设, 2008, 28(6): 32-35, 39.
ZHU Guo-chun, SUI Jin-zun. Optimized design of pre-cooling system for concrete construction for Caojie Pivotal Project for Navigation and Power Generating on Jialingjiang River in Chongqing[J]. China Harbour Engineering, 2008, 28(6): 32-35, 39.
- [2] 龙慧文,张骏. 混凝土预冷二次风冷骨料技术研究与应[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 131-134.
LONG Hui-wen, ZHANG Jun. Research and application of twice air-cooling technology of concrete aggregates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 131-134.
- [3] 水利部水利水电规划设计总院. 水利水电工程施工组织设计手册:第4卷[M]. 北京:水利水电出版社, 2009.
Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWPR. Handbook of construction planning of hydropower and hydroelectric projects: Vol.4[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [4] 李莉. 混凝土出机口温控措施在羊曲水电站的应用[J]. 西北水电, 2015(4): 62-64, 98.
LI Li. Application of heat temperature control facility to concrete at mixer outlet[J]. Northwest Hydropower, 2015(4): 62-64, 98.
- [5] NB/T 35005—2021, 水电工程混凝土生产系统设计规范[S].
NB/T 35005—2021, Code for design of concrete production system for hydropower project[S].
- [6] NB/T 11014—2022, 水电工程混凝土预冷和预热系统设计规范[S].
NB/T 11014—2022, Code for design of concrete precooling and preheating systems for hydropower engineering[S].
- [7] 翁永红,谢向荣,范五一. 三峡工程施工设计与实践[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 111-116.
WENG Yong-hong, XIE Xiang-rong, FAN Wu-yi. The construction design and practice of Three Gorges Project[J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(7): 111-116.
- [8] 关微, 康智明. 水电站混凝土预冷预热技术研究与应[J]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.
GUAN Wei, KANG Zhi-ming. Research and application of concrete precooling and preheating technology in hydropower station [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.



(上接第 63 页)

- ZHANG Qing-he, WANG Dian-zhi, ZHAO Zi-dan. Rheological properties of man-mixed mud and natural deposited mud[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(6): 77-82.
- [5] REED A H, FAAS R W, ALLISON M A, et al. Characterization of a mud deposit offshore of the Patos Lagoon, southern Brazil[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(3): 597-608.
- [6] FAAS R W, REED A H. Comparative analysis of two techniques for determining the rheological properties of fluid mud suspensions[J]. Marine Geotechnology and Geotechnique, 2010, 28(4): 345-362.
- [7] LIU C R, WU B, HUHE A D. A Bingham-Plastic model for fluid mud transport under waves and currents[J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(2): 227-238.
- [8] DEL GAUDIO P, VENTURA G. Flow behavior of clay-silt to sand-silt water-rich suspensions at low to high shear rates: Implications for slurries, transitional flows, and submarine debris-flows[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2018, 92(6): 2395-2404.
- [9] 张瑞波, 庞启秀. 淤泥流变特性试验影响因素研究[J]. 水道港口, 2019, 40(2): 158-162.
ZHANG Rui-bo, PANG Qi-xiu. Research on factors that influence rheological test results of mud[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2019, 40(2): 158-162.
- [10] SENGUPTA S, DE S. Effect of Couette component on the stability of Poiseuille flow of a Bingham fluid-porous system: Modal and non-modal approaches[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(6): 064103.
- [11] ZHU J. Impact of yield stress and fractal characteristics on the flow of Bingham fluid through fracture network[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2020(195): 107637.
- [12] CHIOU J S, NG J. Investigation of Newtonian and non-Newtonian Bingham fluid models for lateral flow simulation of liquefied soil[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110456.
- [13] 王者超, 张皓炜, 龙求喜, 等. 岩体裂隙中宾汉姆流体渗流模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(10): 1459-1466, 1482.
WANG Zhe-chao, ZHANG Hao-wei, LONG Qiu-xi, et al. Bingham fluid seepage model in rock fractures[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(10): 1459-1466, 1482.