

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220338

大型泵站混凝土施工期削峰强度与水化热抑制剂、冷却水管参数的关系探究

张兰兰¹, 李 禹², 强 晟²

(1. 绍兴市水利水电勘测设计院有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 大型竖井贯流式泵站的结构比较复杂,各浇筑块的结构和尺寸不尽相同,温控指标也不同,特别是夏季施工时,温控防裂难度大。对于不同结构部位,应采用精细化的削峰强度指标。利用等效冷却算法分别模拟不同水化热抑制剂掺量和不使用水化热抑制剂情况下,长方体浇筑块在不同水管间距、通水水温、通水流量下的温度峰值削峰强度,提出了一系列定量公式。可根据水化热抑制剂的掺量和削峰强度指标,通过所提公式计算相应通水水温的冷却水管布置密度和通水流量。研究结果可为类似泵站在高温季节施工的定量温控措施制定提供参考。

关键词: 大体积混凝土; 温控; 削峰强度; 水化热抑制剂; 冷却水管

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0154-03

1 概况

马山泵站处于浙江省绍兴市马山大河与曹娥江交汇口右岸,与现状马山闸并排布置。马山泵站主要由内河侧连接段、泵房、外江侧连接段等建筑物组成。马山泵站泵房段长 55.60 m,宽 105.50 m,共设置 4 台单机流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 的竖井贯流泵。泵房段顺水流方向设置一道分缝,顺水流方向将泵房分为两段(进水段和出水段),长度分别为 31.85、23.75 m;泵房段垂直水流方向共分为两联,每联分别布置 2 台机组,垂直水流方向的每一联长度均为 31.50 m。底板厚度大多为 2.00 m;泵站水泵机组中心距为 14.30/15.72 m,进水流道边墩厚为 4.35 m,中墩厚为 4.30 m,缝墩厚为 2.85 m。出水流道单孔流道中间设隔墩,隔墩厚 1.50 m。出水流道边墩厚 4.60 m,中墩厚 4.80 m,缝墩厚为 3.10 m。泵房段块基垂直水流方向总长度为 63.02 m。图 1 为进出水流道有限元模型。出水流道有限元模型单元总数为 87 491 个,节点总数为 98 559 个。进水流道有限元模型单元总数为 96 599 个,节点总数为

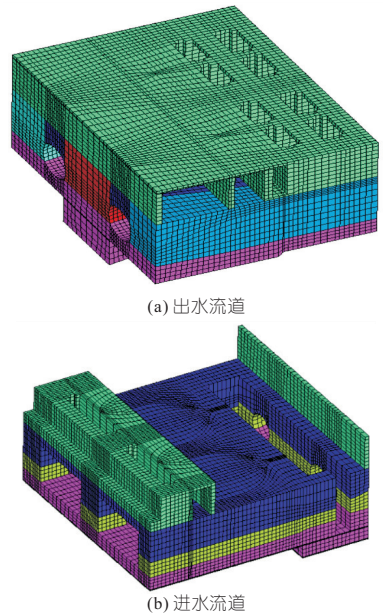


图 1 进出水流道有限元模型

Fig. 1 Finite element model of outlet passage and inlet passage
107 981 个。参考《大体积混凝土温度应力与温度控制》^[1],采用等效冷却算法对泵站开展有限元温控仿真计算,计算时长约 4 h。结果表明,夏季浇筑情况下(浇筑温度 $34 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$),不同浇筑块分别需要削峰 $20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 不等。为达到此削峰力度,

收稿日期: 2022-02-24, **修回日期:** 2022-06-07

基金项目: 浙江省水利厅科技计划项目(RA2103)

作者简介: 张兰兰(1982-),女,工程师,研究方向为水利工程设计,E-mail:112767541@qq.com

通讯作者: 强晟(1977-),男,博士、教授、博导,研究方向为大体积混凝土温控,E-mail:sqiang2118@hhu.edu.cn

在制定具体温控措施时,拟采用数值模拟方法在该工程项目能够达到的冷却水温、冷却水流量的情况下,模拟需采用的水管间距及水化热抑制剂的抑制程度。

2 水冷浇筑块有限元模型和计算参数

建立 7 种不同水管间距的长方体浇筑块,每个长方体长 150 m(与单根水管长度一致),长方体浇筑块的 4 个长条面绝热,两端的两个小面自然散热,放热系数为 $400 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。根据夏季浇筑工况下的削峰强度要求($20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$),按工程经验初步估计如下 7 种间距: $0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $0.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 、 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 、 $0.6 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 、 $0.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。7 个浇筑块有限元模型对应 7 种水管间距,每个浇筑块内含 4 根直行水管。其中一个有限元模型见图 2。浇筑块有限元模型仅截面尺寸不同,节点总数为 8 643 个,单元总数为 7 212 个,计算时长为 5 min。泵站主体采用 C30 混凝土,其绝热温升终值为 $50.8 \text{ }^\circ\text{C}$,导热系数为 $10.44 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,比热为 $1.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,导温系数为 $0.0044 \text{ m}^2/\text{h}$ 。

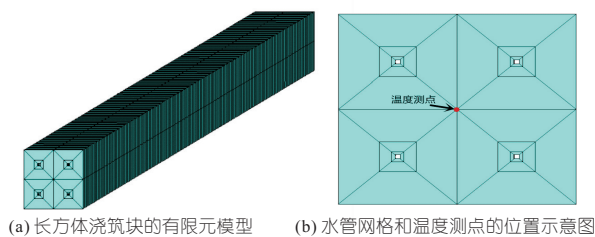


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

3 计算工况

(1)计算工况 1 系列。采用机器制冷水,进口水温为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,根据类似泵站工程经验,通水流量设定为 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据水化热抑制剂用量的多少,绝热温升曲线公式中的系数 a 依次取为 $0.25, 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00$,该系数越大则温升越快,见图 3。本系列对比不同温升速率条件下的削峰强度。

(2)计算工况 2 系列。采用机器制冷水,进口水温为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据类似泵站工程经验,通水流量为 $60 \sim 120 \text{ m}^3/\text{d}$ 。不使用水化热抑制剂,绝热温升曲线公式中的系数 a 取为 1.00 。本系列对比采用机器制冷水时,不同水管间距和不同通水流

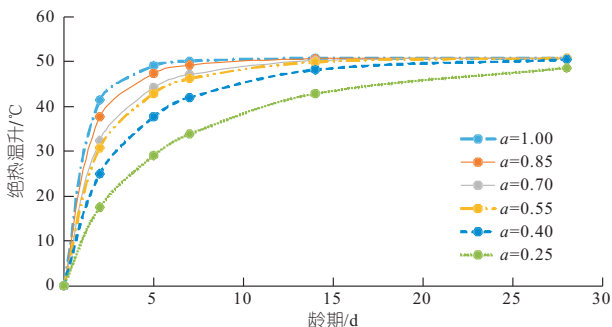


图 3 不同掺量抑制剂产生的绝热温升曲线

Fig. 3 Adiabatic temperature rise curve produced by different dosage of inhibitor

量条件下的削峰强度。

(3)计算工况 3 系列。冷却用水为深层河水,进口水温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$,根据类似泵站工程经验,通水流量为 $60 \sim 120 \text{ m}^3/\text{d}$ 不等。不使用水化热抑制剂,绝热温升曲线公式中的系数 a 取为 1.00 。本系列对比采用河水时,不同水管间距和不同通水流量条件下的削峰强度。

4 仿真计算结果与冷却水管布置方案建议

4.1 仿真计算结果

图 4(a)为削峰强度与水化热抑制剂、水管间距之间的关系曲线。工况 1 系列中保持通水水温和流量不变,同一水化热抑制剂掺量下,水管布置密度越大,削峰强度越强;同一水管间距下,水化热抑制剂掺量越多,削峰强度越强。

根据图 4(a),可以确定出三者之间的定量表达式为:

$$Z = 61.01 - 37.56\rho - 22.96a \quad (1)$$

其中 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 式中, Z 为削峰强度, $^\circ\text{C}$; x 为水管水平间距的一半, m ; y 为水管垂直间距的一半, m 。

根据文献[2]的结论,水化热抑制剂能够明显延缓水化过程中热量的产生,降低温度梯度。这与式(1)、图 3、4(a)一致。同一水管间距条件下,水化热抑制剂的掺量决定了削峰强度。

图 4(b)为 6 月份浇筑(浇筑温度 $34 \text{ }^\circ\text{C}$)、冷却水 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下削峰强度与水管间距、通水流量的关系曲线。由于水化热抑制剂掺量为 0,水化热放热过程较快,不利于温控防裂,因此削峰强度指标要求较高,故工况 2、3 系列较工况 1 系列进一步加密水管间距。图 4(b)中,水管间距为 $0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 和 $0.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的削峰强度分别集中于 $40, 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,可见加密水管间距有利于削峰。

图 4(c)为 6 月份浇筑、深层河水 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件

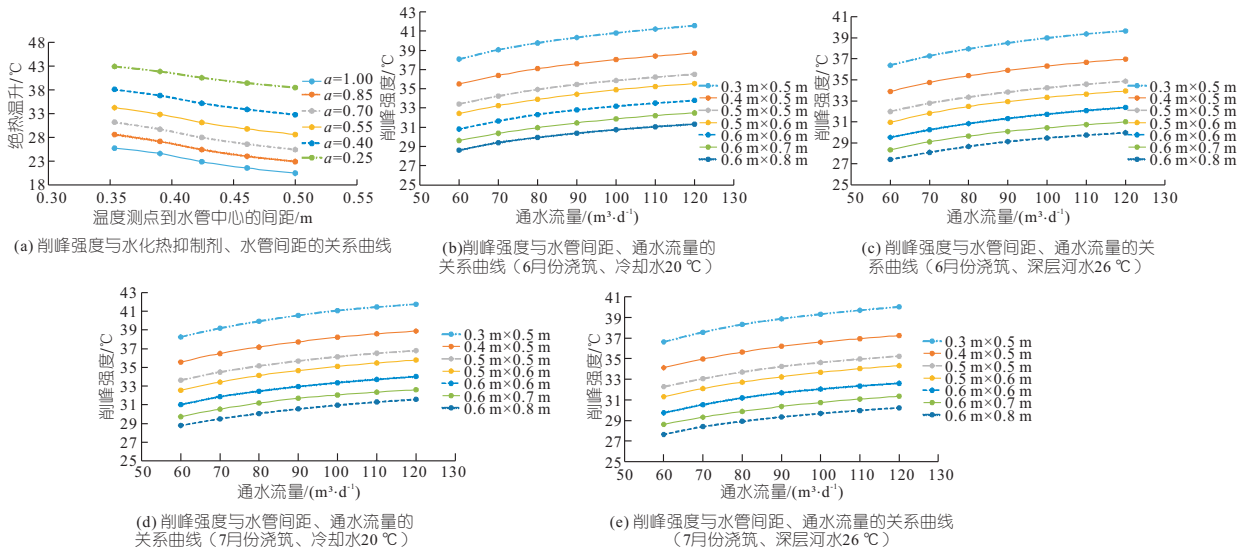


图 4 削峰强度与水化热抑制剂、水管间距、通水流量的关系曲线

Fig. 4 Curve of relationship between peak cutting intensity and hydration heat inhibitor, water pipe layout, water flow

下削峰强度与水管间距、通水流量的关系曲线。对比图 4(b)，削峰强度与通水流量依旧保持正比关系，但由于通水水温的提高，要想达到相同的削峰强度就必须选择较密的水管间距和较大的通水流量。

图 4(d)为 7 月份浇筑、冷却水 20 °C 条件下削峰强度与水管间距、通水流量的关系曲线。图 4(e)为 7 月份浇筑、深层河水 26 °C 条件下削峰强度与水管间距、通水流量的关系曲线。7 月份气温较 6 月份有所升高，导致浇筑温度提高了 2 °C，不利于温控防裂，因此削峰强度指标进一步提高。

根据图 4(b)~(e)，可以确定出不使用水化热抑制剂的前提下，削峰强度、水管间距、单管通水流量三者之间的定量表达式分别为：

$$Z = 47.66 - 45.26\rho - 0.05q \quad (2)$$

$$Z = 45.43 - 42.82\rho - 0.05q \quad (3)$$

$$Z = 47.77 - 45.33\rho - 0.05q \quad (4)$$

$$Z = 45.73 - 43.07\rho - 0.05q \quad (5)$$

式中， q 为通水流量， m^3/h 。

陈伟等^[3]利用 MidasFEA 探究了大尺寸混凝土底板埋设冷却水管的温度场与冷却水温、通水流量、水管材质、管径、管距及单根水管长度的关系，与式(2)~(5)计算结果一致，通水流量越大，水管间距越小，削峰效果越好。

在不采用水化热抑制剂情况下，基于式(2)~(5)，可以根据其中任意两个因素，确定第三个因素。若采用水化热抑制剂，则需再综合考虑式(1)。

4.2 冷却水管布置方案建议

限于预算，实际工程中未采用水化热抑制剂。故结合不同部位最高温的削峰强度要求，基于式(2)~(5)，给出马山泵站不同部位的冷却水管布

置方案建议，见表 1。

表 1 马山泵站不同部位的建议水管间距
Tab. 1 Suggested pipe layout for different parts of Mashan Pumping Station

部位	水管间距(竖直 间距×水平间距)
底板	0.6 m×0.8 m
流道层中墩底部和分流小隔墙底部 1.45 m 高度范围内	0.3 m×0.5 m
流道层底部 1.45 m 高度范围内的其余部位	0.4 m×0.5 m
流道层中部 3.00 m 高度范围内	0.6 m×0.6 m
流道层上部 3.00 m 高度范围内和上部墙体	0.6 m×0.8 m

5 结论

a. 大体积薄壁结构的实际施工中，冷却水管间距太小会造成浇筑振捣困难，高温季节浇筑时，在一定水管间距条件下，可采用水化热抑制剂来调节削峰强度。具体抑制程度可参考式(1)估算。

b. 大型竖井贯流式泵站的结构较为复杂，不同部位应采取不同冷却水管布置方案，可避免统一布置方案导致较薄的结构部位削峰强度过大、较厚的结构部位削峰强度过小所带来的应力超标等问题。不同削峰强度所对应的水管间距、流量、水温参数，可参考式(2)~(5)估算。

参考文献：

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京：中国电力出版社，1999.
[2] 张小平，纪宪绅，刘虎，等. 水化热抑制剂对混凝土温度场效应分析[J]. 粉煤灰综合利用，2021，35(1)：118-123，140.
[3] 陈伟，张燎军，卢斌，等. 大型泵站混凝土底板冷却水管布置方案研究[J]. 水电能源科学，2012，30(1)：170-173，212.

