

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.016

# 基于工程可行性的船闸底板水管冷却方案研究

黄 铭, 周 磊

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**冷却水管通水降温是大体积混凝土常用的温控措施,合理的水管冷却方案不仅要保障混凝土的温度和应力满足要求,避免裂缝的产生,同时也要兼顾经济成本和施工可行性。为得出切实可行的水管冷却方案,文章以船闸底板混凝土工程为例,首先基于温度实测值对大体积混凝土的热学参数进行动态反演,获取混凝土施工期真实的热学参数以保障有限元计算的准确性。综合考虑参数对温度的影响以及施工可行性,提出改变水管布置形式、通水时间、通水流量优化水管冷却方案。结果表明,3 种水管冷却方案混凝土的最大温差不超过 25 °C,达到了防裂效果,且方案 2 节约经济成本,方案 3 兼具成本控制和便捷施工的优势,为后续底板混凝土工程水管冷却方案的制定提供了指导。

**关键词:**水管冷却;大体积混凝土;温度应力;动态反演;有限元法

中图分类号:TV315

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)07-0970-06

## Research on water pipe cooling scheme of lock floor based on engineering feasibility

HUANG Ming, ZHOU Lei

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Water pipe cooling is a common temperature control measure for mass concrete. A reasonable water pipe cooling scheme should not only ensure that the temperature and stress of concrete meet the requirements and avoid cracks, but also take the economic cost and construction feasibility into account. In order to obtain a feasible water pipe cooling scheme, taking the concrete project of lock floor as an example, the thermal parameters of mass concrete are dynamically inversed based on the measured temperature, and the real thermal parameters during concrete construction are obtained to ensure the accuracy of finite element calculation. Considering the influence of parameters on temperature and the feasibility of construction, the water pipe cooling schemes are optimized by changing the water pipe layout, water flow time and water flow rate. The finite element calculation and analysis of temperature field and stress field show that the maximum temperature difference of concrete in the three water pipe cooling schemes is less than 25 °C, and the crack prevention effect is achieved. The scheme 2 saves economic costs, and the scheme 3 has the advantages of cost control and convenient construction, which provides guidance for the formulation of water pipe cooling schemes in subsequent floor concrete projects.

**Key words:** water pipe cooling; mass concrete; temperature stress; dynamic inversion; finite element method

大体积混凝土结构在水利工程中被广泛使用,其开裂问题对工程的安全性危害较大,因此在工程建设过程中应重点防范。混凝土裂缝的成因众多,其中最主要的因素是混凝土浇筑后因为水泥水化发热形成了较大的内外温差,所以形成较大的温度应力使混凝土结构受拉破坏<sup>[1]</sup>。为指导

混凝土工程合理施工,降低其开裂风险,在工程中常采用通水冷却的方法保障混凝土结构的温度和应力满足规范要求<sup>[2]</sup>。

影响水管冷却效果的因素众多,如水管布置形式、通水时间、通水流量、水温等<sup>[3]</sup>,在制定水管冷却方案时不仅要考虑不同因素对冷却效果的影

收稿日期:2024-03-25;修回日期:2024-05-27

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085US01)

作者简介:黄 铭(1972—),男,江西乐平人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:Lsxhuangm@hotmail.com.

响大小,同时也要结合实际工程中的情况,保证制定的冷却方案切实可行,便于施工的进行。研究水管冷却参数对温度的影响是学术界和工程界普遍关注的问题<sup>[4-6]</sup>,而如何结合工程实际情况制定冷却方案成为当前研究应用的重点<sup>[7-9]</sup>。因此,本文分析水管参数的影响和实际施工情况,选择对混凝土温度影响较大以及工程中易于控制的水管布置形式、通水时间和通水流量3个因素作为对比变量,旨在制定出对实际工程具有较大指导意义、且能较好地直接应用于工程中的水管冷却方案。同时考虑到混凝土热学参数对温度计算结果的影响,通过动态反演得出对温度影响较大的热学参数,以此保障后续各冷却方案下混凝土温度场和应力场计算的准确性,对混凝土的状态作出可靠的判断,以期制定出兼顾降温防裂效果和工程实际应用的水管冷却方案提供科学依据。

## 1 有限元计算原理与工程概况

### 1.1 混凝土温度场有限元计算方法

在计算域  $R$  内任何一点处,非稳定温度场  $T(x, y, z, \tau)$  须满足热传导方程<sup>[10-12]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

其中:  $T$  为温度;  $a$  为混凝土导温系数;  $\theta$  为混凝土绝热温升;  $\tau$  为时间。

上述热传导方程建立了温度场与时间、空间的一般关系,还需要确定方程的初始条件和边界条件使得方程有唯一解。在采用有限元方法计算大体积混凝土温度场时,对式(1)进行空间域离散和时间域差分,根据工程现场实际的混凝土浇筑温度和散热情况确定初始条件和边界条件,从而实现大体积混凝土非稳定温度场的有限元计算。

### 1.2 工程概况

小溪滩水利枢纽工程位于龙游县境内,是衢江干流六级开发中的第四级枢纽。小溪滩船闸布置在枢纽右岸防洪堤处,位于整个枢纽右侧。船闸底板混凝土采用分缝施工,共计32块,每块底板厚度为2.5 m,顺水流方向长15.0 m,垂直水流方向长度为16.1 m,进行温度场计算时考虑已浇筑完成的侧边侧墙和下方基础的散热影响。在进行底板混凝土浇筑时,通过冷却水管进行通水冷却,在顺水流方向中心剖面位置埋设温度传感器对混凝土温度进行监测记录。

### 1.3 有限元模型的建立

以长方体混凝土底板的一个顶点为坐标轴原

点,以垂直水流方向为  $X$  轴、顺水流方向为  $Y$  轴、高度方向为  $Z$  轴建立坐标系。按工程结构尺寸建立混凝土模型,以整个混凝土结构尺寸的2.5倍大小建立地基模型参与计算。在温度场计算中,采用 SOLID70 单元离散混凝土和地基模型,通过热流耦合算法考虑冷却水管的作用<sup>[13]</sup>,然后再采用 FLUID116 单元离散冷却水管模型。混凝土结构网格划分时以  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$  为主,地基结构网格划分以  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$  为主,共计124 078个节点,110 926个单元,有限元网格模型如图1所示。

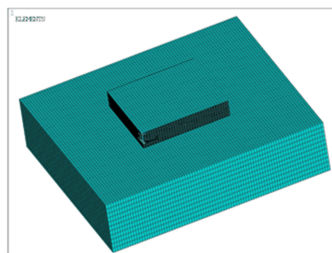


图1 有限元网格模型

当混凝土温度场计算完成时,将分析类型转化为结构分析, SOLID70 单元转化为 SOLID45 单元,温度场结果作为荷载用于应力场的计算。

### 1.4 热学参数动态反演

对于混凝土的水化热计算,选择工程应用广泛、与试验资料符合较好的双曲线式,具体为:

$$Q(t) = \frac{Q_0 t}{n + t} \quad (2)$$

其中:  $Q(t)$  为混凝土龄期  $t$  时的累积水化热;  $Q_0$  为水泥的最终水化热;  $t$  为龄期;  $n$  为常数。

结合相关文献<sup>[14-16]</sup>对混凝土热学参数特性以及参数对混凝土温度影响的分析,本文选择了混凝土浇筑后对温度场影响较大且不易确定的导热系数  $\lambda$ 、水化热函数中的最终水化热  $Q_0$  和常数  $n$  共3个参数作为反演对象。通过正交设计试验形成反演参数样本组合<sup>[17]</sup>,由温度场有限元计算获得温度样本值并将其作为网络输入,反演参数样本组合作为网络输出,投入反向传播神经网络进行训练,构建热学参数动态智能反演模型。基于温度实测数据反演出当天的热学参数后,将其作为已知值参与温度场有限元计算,然后再进行下一天的热学参数反演。重复上述动态反演过程获得混凝土热学参数的变化规律,其中最终水化热  $Q_0$  和常数  $n$  的反演结果如图2所示。

由图2可知,2个参数在反演时间段内未表现出明显的随时间变化规律,整体上相对稳定,因

此将  $Q_0$  和  $n$  取反演时间段内的平均值,单独进行  $\lambda$  动态反演,从而节省计算时间、提高反演效率,所得结果如图 3 所示。

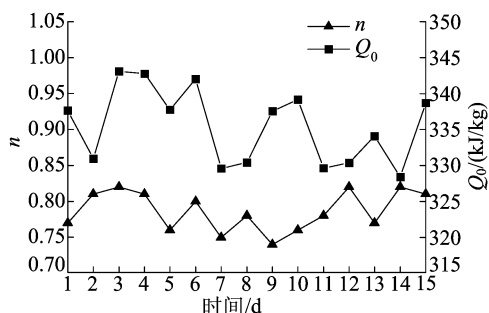


图 2 最终水化热  $Q_0$  和常数  $n$  动态反演结果

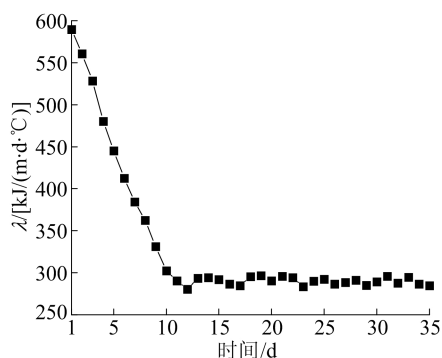


图 3 导热系数动态反演结果

由图 3 可知,  $\lambda$  在前期快速下降, 11 d 后基本趋于稳定。混凝土浇筑后, 其形态由流态过渡到塑性并逐渐固化, 其内部孔隙率的增大导致混凝土的导热能力减小, 因此  $\lambda$  也随之快速减小,  $\lambda$  反演结果与工程实际情况相符<sup>[16]</sup>。

对于反演结果的准确性, 还需通过正分析计算进行验证。将  $\lambda$  的动态反演值、 $Q_0$  和  $n$  的反演均值代入温度场有限元模型进行计算, 得出 3 个测点 T1、T2 和 T3 的反演计算温度, 与实测温度进行对比, 结果如图 4 所示。

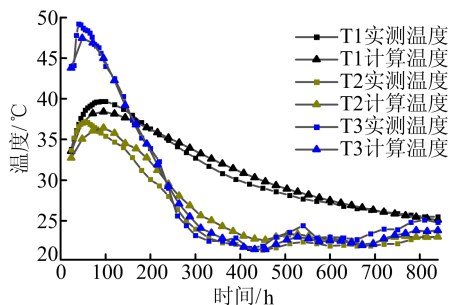


图 4 基于反演成果的温度计算值与实测值对比

由图 4 可知, 基于反演成果的温度计算值与温度实测值变化规律基本一致, 在整个时间段的

数值也基本吻合, 说明反演效果较好, 能反映工程中混凝土热学参数的真实情况。

通过动态反演得出了混凝土热学参数的演变规律, 可以反映实际工程中混凝土的真实热学性能, 为后续计算各水管冷却方案下的底板混凝土温度场提供了可靠的参数。

## 2 水管冷却方案的制定

### 2.1 水管参数影响效果分析与方案制定

在制定水管冷却方案时, 需要分析水管参数对温度的影响, 并考虑方案便于工程施工。水管冷却效果的影响因素众多, 主要有水管布置形式、水温、管径、通水流量和通水时间<sup>[18]</sup>, 目前底板混凝土的冷却方案采用双层水管布置, 水管间距为 1.5 m, 水温 25 °C、通水流量为 1.3 m<sup>3</sup>/h、通水时间为 35 d、管径为 28 mm。冷却水温度越低, 冷却效果越好, 但过低的水温会导致水管附近的混凝土温差过大而受拉破坏<sup>[1]</sup>, 且实际工程中调整水温相对复杂, 因此在制定水管冷却方案时, 不改变现有方案的水温。改变管径对冷却效果的影响并不显著, 且改变管径则需要更换现有水管材料, 因此沿用原方案的水管管径。

水管的布置形式对冷却效果有着较大影响<sup>[19]</sup>, 现有的双层水管布置较为复杂, 不便于施工, 且使用的水管材料较多, 可考虑简化成单层布置并适当减小间距, 简化布置形式的同时也能保证冷却效果。改变通水流量在施工中可行性较高, 且改变通水流量对温控效果也有一定的影响<sup>[20]</sup>, 因此在设计对比方案时, 应考虑改变该参数。一般来说, 通水时间越长, 冷却效果越好, 调整通水时间在工程中易于实现, 但通水达到一定时间后, 混凝土的温度就下降到比较稳定的水平, 此时继续通水冷却的效果并不显著, 由温度计算结果可知, 底板混凝土在通水 15 d 后温度下降到较低的水平, 因此将通水时间调整为 15 d。

通过各水管参数的影响分析并结合本文船闸底板混凝土工程, 本研究提出以下 3 种水管冷却方案, 见表 1 所列。

表 1 水管冷却方案对比

| 参数及布置                    | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
|--------------------------|------|------|------|
| 通水时间/d                   | 35   | 15   | 15   |
| 通水流量/(m <sup>3</sup> /h) | 1.3  | 1.0  | 1.5  |
| 冷却水管布置形式                 | 双层   | 双层   | 单层   |

其中方案 1 为目前底板混凝土施工采用的方

案,方案1和方案2采用双层水管布置形式,方案3采用单层水管布置形式。冷却水管具体布置形式分别如图5、图6所示。

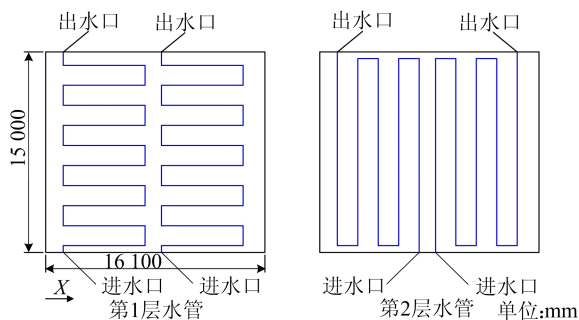


图5 方案1和方案2冷却水管布置图

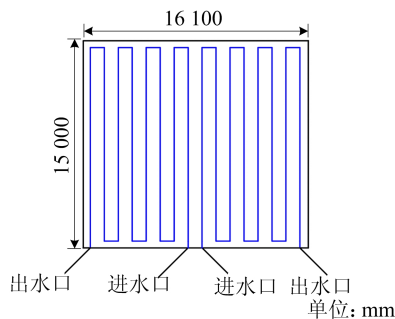


图6 方案3冷却水管布置图

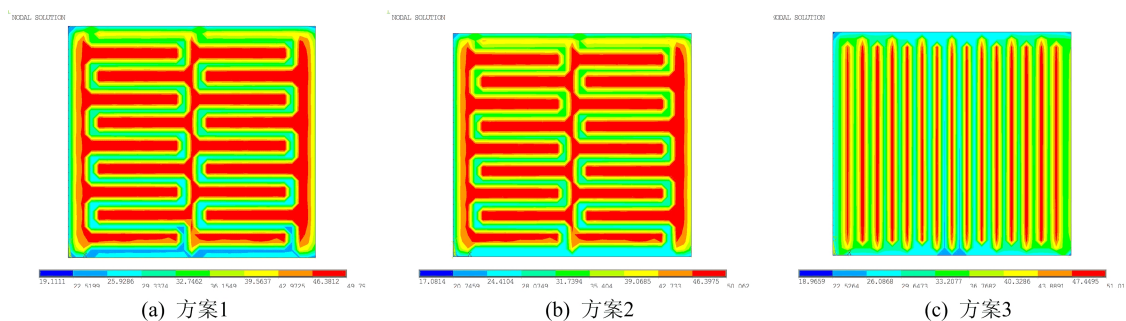


图7 各方案下温度最高位置云图

由图7可知:方案1和方案2的温度场分布规律相似,但方案2的最高温度略高于方案1,这是由于2种方案采用的冷却水管布置形式相同,但方案2的通水流量小于方案1,冷却效果稍弱于方案1。方案3采用单层布置的同时加密了水管间距,温度场分布更加均匀。

大体积混凝土的开裂主要是由于内外温差过大导致混凝土受到过大的拉应力而开裂破坏,在施工中需要重点关注结构内外温差,一般要求混凝土最大内外温差不得超过 $25^{\circ}\text{C}$ ,提取3种冷却方案下混凝土内部最高温度和表面最低温度,计算内外温差,结果如图8所示。

## 2.2 水管冷却方案在工程中的应用

将3种水管冷却方案的用水量和水管长度进行对比,见表2所列。

表2 冷却方案用水量和水管长度对比

| 参数                | 方案1   | 方案2 | 方案3 |
|-------------------|-------|-----|-----|
| 用水量/ $\text{m}^3$ | 1 092 | 360 | 540 |
| 水管长度/m            | 314   | 314 | 240 |

由表1、表2可知:方案2减少了通水时间和流量,相比方案1减少了67.0%的用水量,节约了经济成本;方案3减少了用水量,简化了水管布置形式,相比方案1减少了50.5%的用水量,减少了23.6%的水管长度。因此节约了经济成本,同时可以加快施工进度。

## 3 混凝土温度场与应力场计算

### 3.1 温度场计算结果分析

基于热学参数动态反演的成果,对3种水管冷却方案下的底板混凝土温度场进行计算,各方案下最高温度云图如图7所示。通过计算结果可知,方案1和方案2出现最高温度的位置位于高度0.8 m、接近右侧侧墙1.5 m的位置,方案3出现在高度1.2 m处接近右侧侧墙位置。

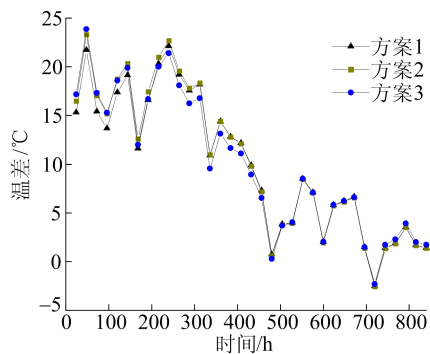


图8 各冷却方案下内外最大温差曲线

由图8可知,3种方案最大温差随时间变化



规律基本一致,方案 1 的最大温差略低,第 10 天起方案 3 的最大温差低于另外 2 种方案,而在约 20 d 后 3 种方案的最大温差基本一致。3 种冷却方案下混凝土结构的最大温差均小于 25 °C,满足规范要求<sup>[21]</sup>。

### 3.2 应力场计算结果分析

根据大体积混凝土相关施工标准,抗拉强度计算式<sup>[21]</sup>为:

$$f_{tk}(t) = f_{tk}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (3)$$

其中: $f_{tk}(t)$ 为混凝土龄期  $t$  时的抗拉强度标准值; $t$ 为龄期; $f_{tk}$ 为混凝土抗拉强度标准值,C25 混凝土按规范取为 1.78 MPa; $\gamma$ 为系数,应根据所用混凝土进行试验确定,当无试验数据时,可取 0.3。

将温度场的计算结果应用于混凝土应力场的计算中,提取应力场计算的每天最大拉应力曲线并与对应龄期的抗拉强度标准值进行对比,结果如图 9 所示。

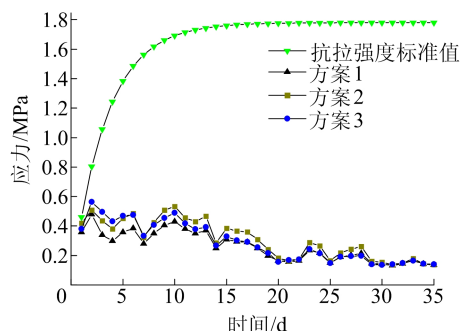


图 9 各方案最大拉应力与抗拉强度标准值对比

由图 9 可知,3 种方案下在整个时间段内混凝土最大拉应力均小于抗拉强度标准值,不会出现开裂的风险。方案 1 的最大拉应力在前期最小,方案 2 的最大拉应力从第 8 天起在 3 种方案中最大,方案 3 的最大拉应力在前期较大,从约 15 d 后与方案 1 基本一致。将最大拉应力与对应龄期的抗拉强度标准值对比可以发现,在浇筑后前 2 d,混凝土抗拉强度较小,各方案下的最大拉应力与之接近,而随着抗拉强度的增长,从第 3 天起抗拉强度就远高于各方案下的混凝土最大拉应力,开裂风险性很低。

### 3.3 水管冷却方案对比分析

结合 3 种冷却方案的温度场、应力场计算分析结果和本船闸底板混凝土工程的实际施工情况来看,目前采用的水管冷却方案和设计的 2 种优化方案的温度与应力都是符合温控规范要求的。综合分析水管长度、用水量需求和施工便捷性可

知:方案 2 较现有方案 1 减少了通水时间、通水流量,节约经济成本;方案 3 则较现有方案 1 不仅减少了用水量 and 水管长度,节约经济成本,还简化了水管布置形式,方便施工进行,可加快工程进度;方案 3 相比方案 2,虽然用水量稍多,但单层水管这种简化方式对实际施工意义较大,且根据应力场的计算结果来看,方案 3 的安全性也高于方案 2。综合上述分析,方案 3 在 3 种水管冷却方案中有比较明显的优势,因此在后续混凝土工程中可以优先考虑采纳。

## 4 结 论

1) 通过动态反演的方法获得了混凝土施工期热学参数随时间的变化规律,发现最终水化热  $Q_0$  和常数  $n$  在施工期基本稳定,而导热系数  $\lambda$  在混凝土浇筑初期呈现出明显随时间减小的趋势,随后趋于稳定。将热学参数反演结果代入温度场有限元模型中进行计算,温度计算值与实测值吻合程度较高,说明反演效果好,所得热学参数能反映实际工程中混凝土的真实热学性能。

2) 对水管冷却方案提出优化措施,基于动态反演结果对 3 种水管冷却方案进行温度场和应力场的计算对比分析,结果表明 3 种水管冷却方案下,混凝土结构的最大温差均小于 25 °C,满足规范要求。相比方案 1,方案 2 减少了 67.0% 的用水量,而方案 3 减少了 50.5% 的用水量和 23.6% 的水管长度,节约经济成本,且所采用的单层水管布置形式简单、施工便捷,在 3 种方案中优点更为突出,可为类似混凝土工程中水管冷却方案的制定提供参考。

## [参 考 文 献]

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2012:1-5.
- [2] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却[J]. 水利学报, 2010, 41(5):505-513.
- [3] 张兰兰,李禹,强晨. 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[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3):154-156,220.
- [4] 段炼. 基于单一通水方向的泵站底板水管冷却方案研究[J]. 人民长江, 2023, 54(11):139-144,151.
- [5] 邢坦,胡文才,王振红. 碾压混凝土坝陡坡坝段施工期温控防裂研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(2):132-137.
- [6] 辜光磊,许蔚,吴永红,等. 大体积混凝土水管冷却温控技术的优化[J]. 混凝土, 2021(11):141-145.
- [7] 司政,王三禄,王正鑫,等. 基于热流耦合算法的大体积混凝土水管冷却仿真分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(3):

- 270-275.
- [8] 许后磊,舒德伟,唐季,等. 大体积混凝土入仓温度控制及水管冷却优化技术研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(增刊1):144-150.
- [9] 张超,常晓林,刘杏红. 大体积混凝土施工期冷却水管埋设形式的优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(3):276-282.
- [10] 许继刚,王振红,汪娟,等. 大坝混凝土通水冷却方式和表面保温力度研究[J]. 人民黄河,2020,42(10):134-141.
- [11] 李硕,李同春,孙永明,等. 三洋港水闸底板水管冷却温控措施优化研究[J]. 水利水电技术,2015,46(3):65-69.
- [12] 陈渴鑫,田斌,陈博夫,等. 大体积混凝土冷却水管优化研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(2):31-34.
- [13] 刘杏红,马刚,常晓林,等. 基于热-流耦合精细算法的大体积混凝土水管冷却数值模拟[J]. 工程力学,2012,29(8):159-164.
- [14] 傅少君,韩燕华. 热学参数的时间演变对混凝土温度场影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(增刊1):347-351.
- [15] 杨婷婷. 基于遗传算法的碾压混凝土坝温度场反分析[D]. 西安:西安理工大学,2010:38-40.
- [16] Reinhardt H W, Blaauwendraad J, Jongendijk J. Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties [C]//RILEM International Conference of Concrete at Early Ages. Paris: [s. n.], 1982:211-218.
- [17] 庞超明,黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京:东南大学出版社,2018:37-48.
- [18] 张尧. 水闸施工期温度场及多参数组合下水管冷却效果模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016:47-64.
- [19] 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.
- [20] 张玉平,张亚昕,李传习. 某桥支墩基础大体积混凝土温控及参数分析[J]. 交通科学与工程,2019,35(2):51-57.
- [21] GB 50496—2018 大体积混凝土施工标准[S].

(责任编辑 吴 亮)

## (上接第 928 页)

- [3] Shi Y, Wang M, Ding Y, et al. Effects of Maillard reaction on structural modification and potential allergenicity of peanut 7S globulin (Ara h1)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15):5617-5626.
- [4] Hnasko R M, Lin A V, Mcgarvey J A, et al. Sensitive and selective detection of peanut allergen Ara h1 by ELISA and lateral flow immunoassay [J]. Food Chemistry, 2022, 396:133657.
- [5] Hu Y, Lin J, Peng L, et al. Nanobody-based electrochemical immunoassay for sensitive detection of peanut allergen Ara h1[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(19):7535-7545.
- [6] Xu S, Ji X, Xu W, et al. Surface-enhanced Raman scattering studies on immunoassay[J]. Journal of Biomedical Optics, 2005, 10(3):031112.
- [7] Song Y, Li W, Xu H. Recent advances and trends in aptasensors for sensitive detection of foodborne pathogens in various foods [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2023, 167:117268.
- [8] 雷雨燕,李晓晖,刘义,等. 基于核酸适配体的生物标志物检测方法研究进展[J]. 化学通报,2024,87(1):36-43.
- [9] 经男男,王静,汤新景. 环状寡聚核苷酸的研究进展[J]. 中国科学:化学,2018,48(11):1293-1306.
- [10] Mohsen M G, Kool E T. The discovery of rolling circle amplification and rolling circle transcription[J]. Accounts of Chemical Research, 2016, 49:2540-2550.
- [11] Gupta R, Singh V, Sarawagi N, et al. Salmonella typhimurium detection and ablation using OmpD specific aptamer with non-magnetic and magnetic graphene oxide [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2023, 234:115354.
- [12] 叶华,刘洪顺,俞玥,等. 利用氧化石墨烯纳米片构建黄曲霉毒素 B1 荧光快速检测方法[J]. 食品研究与开发,2022,43(16):127-132.
- [13] Guo Z, Tian J, Cui C, et al. A label-free aptasensor for turn-on fluorescent detection of ochratoxin A based on SYBR Gold and single walled carbon nanohorns[J]. Food Control, 2021, 123:107741.
- [14] Lv L, Li D, Liu R, et al. Label-free aptasensor for ochratoxin A detection using SYBR Gold as a probe[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2017, 246:647-652.
- [15] Mao Y, Liu M, Tram K, et al. Optimal DNA templates for rolling circle amplification revealed by in vitro selection [J]. Chemistry (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2015, 21(22):8069-8074.
- [16] He Y, Yi C, Zhang X, et al. Magnetic graphene oxide: synthesis approaches, physicochemical characteristics, and biomedical applications[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2021, 136:116191.

(责任编辑 闫杏丽)