

# 基于半绝热法的现场大体积混凝土水化热预测方法研究

宋健<sup>1</sup>, 舒小娟<sup>2</sup>, 蒋宇翔<sup>2</sup>, 沈明燕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海

<sup>2</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年7月26日; 录用日期: 2024年8月17日; 发布日期: 2024年8月27日

## 摘要

在大体积混凝土施工过程中, 控制浇筑时的水化热是确保施工质量的关键步骤。目前, 主要通过有限元仿真计算来模拟浇筑过程中体系温度的变化。然而, 有限元分析得到的模拟数据与实测数据存在较大差距, 只能通过后期调整有限元模型的参数来逼近实测数据, 无法有效指导施工。为了解决这一问题, 本文提出了一种基于半绝热法的现场大体积混凝土水化热预测方法。利用自制的简易水化热测试装置测定实际配合比下混凝土的绝热温升曲线, 通过推导得到修正的热源函数模型, 并结合实验室标定的水泥水化过程中导热系数函数的时变模型, 对有限元分析模型进行修正, 使其更加符合实际情况, 更贴近实测水化热数据。通过实际工程案例的实测数据与有限元模拟结果的分析, 发现此方法可以有效减少有限元模拟结果与实测数据的误差, 更有效地指导现场施工, 对于控制大体积混凝土水化热引起的温度应力裂缝具有重要意义。

## 关键词

大体积混凝土, 水化热, 半绝热法, 热源函数, 有限元分析

## Research on the Prediction Method of Hydration Heat of Mass Concrete On-Site Based on the Semi-Adiabatic Method

Jian Song<sup>1</sup>, Xiaojuan Shu<sup>2</sup>, Yuxiang Jiang<sup>2</sup>, Mingyan Shen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 27<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 宋健, 舒小娟, 蒋宇翔, 沈明燕. 基于半绝热法的现场大体积混凝土水化热预测方法研究[J]. 土木工程, 2024, 13(8): 1496-1505. DOI: 10.12677/hjce.2024.138161

## Abstract

Controlling the hydration heat during the pouring of mass concrete is a crucial step to ensure construction quality. Currently, finite element simulation is primarily used to model the temperature variations during the pouring process. However, significant discrepancies often exist between the simulated data from finite element analysis and the actual measured data. These discrepancies can only be minimized by post-adjustment of the finite element model parameters, which is insufficient for effective construction guidance. To address this issue, this paper proposes an on-site prediction method for the hydration heat of mass concrete based on the semi-adiabatic method. A self-made, simple hydration heat testing device is used to determine the adiabatic temperature rise curve of concrete with the actual mix proportions. By deriving a corrected heat source function model and integrating a time-varying thermal conductivity function model calibrated in the laboratory during the cement hydration process, the finite element analysis model is adjusted to better align with real conditions and closely match the measured hydration heat data. Analysis of measured data from practical engineering cases and finite element simulation results demonstrates that this method effectively reduces the error between simulated and measured data. It provides more reliable guidance for on-site construction and is significant for controlling temperature-induced stress cracks in mass concrete due to hydration heat.

## Keywords

Mass Concrete, Hydration Heat, Semi-Adiabatic Method, Heat Source Function, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着大跨度桥梁在高速公路中的应用增加,混凝土用量也在增多。大体积混凝土凝结硬化过程中会释放大量热量,导致结构中心温度显著高于边界温度。若不采取有效散热措施,当内外温差超过 25℃时,会产生裂缝,影响结构耐久性[1] [2]。

为解决温度拉应力引起的混凝土开裂问题,工程技术人员通过数值计算研究大体积混凝土内部温度发展及应力规律。通常根据经验确定热源函数和边界条件,利用有限元软件模拟水化热过程,计算温度场和应力场,以预防温度裂缝的产生。王彦丹等[3]基于混凝土的二维三相细观几何模型对混凝土的热学参数进行了深入分析。通过对比试验结果和模型预测,发现混凝土的密度和导热系数随着温度的升高而逐渐下降。Tang 等[4]提出了一个二维数值模型,用于研究混凝土在微观和宏观尺度上的导热系数。研究表明,混凝土的有效导热系数主要取决于粗骨料的导热系数和其体积分数。赵育等[5]采用 ANSYS 软件进行数值模拟,提出了一种新的混凝土导热系数计算方法,并验证了其有效性。李守巨等[6]利用 ANSYS 模拟了岩土材料的导热系数与孔隙率的关系,发现导热系数随着孔隙率的增加而减小 Lu 等[7]考虑了混凝土中水、空气、骨料和水泥砂浆四种组分,建立了与孔隙率和含水率等因素相关的导热系数预测模型。此外, Tang 等[8]通过分形网络模拟,研究了不同水化龄期的水泥浆在干燥状态下的导热系数,结果表明其导热系数随着龄期增加而呈下降趋势。这些研究为进一步理解和预测混凝土的热学行为提供了重要参考。但是,通过有限元模型计算的结果与实测值有较大差别,需要通过现场试验数据进行修正,

不能很好地指导施工。

本文旨在通过开发一种简易的现场实验装置来测定水泥水化过程中的发热量，从而修正热源函数。随后，采用有限元软件进行实际热量计算，以高效、便捷的操作方式更准确地指导施工过程。这一方法对于控制大体积混凝土水化热引起的温度应力裂缝具有重要意义。文章第 2 节介绍了现场大体积混凝土水化热预测装置的设计、修正方法及其原理。第 3 节则对比分析了基于经验公式与修正热源函数的有限元水化热分析结果，以评估其对某桥墩盖梁大体积混凝土的适用性。第 4 节对本文的研究成果进行了讨论，并提出了相关结论。

## 2. 现场大体积混凝土水化热预测方法

### 2.1. 测试装置及其计算原理介绍

大体积混凝土水化热测定的标准方法主要分为溶液法和半绝热法两类。本文基于半绝热法对现场大体积混凝土的水化热进行预测和标定，采用 EN196-9 标准中的半绝热法设计现场实验装置，测定混凝土水化过程中的热量释放，从而修正热源函数，并计算实际产生的热量。

本研究团队设计了一种水化热测试装置，用于测定水泥浆体的散热常数  $K$  和总热容  $C_p$ 。该装置主要由水泥反应盒、保温隔热材料、排气装置、温度传感器、数据采集仪和存储设备组成[9]。同时，该文献[9]利用自制水化热测试装置与采用 TAM-Air 法的实验室设备进行水泥水化热温度的测定，可以发现所提出的水化热测试装置相较于专业设备，其测试结果误差控制在 9.5% 以内，满足工程现场测试的需求。此外，在进行水化热测量之前，需要使用电替代法校准半绝热量热计的总热损失系数  $\alpha$  和热容  $\mu$ 。具体测试装置的布置示意图见图 1 所示。

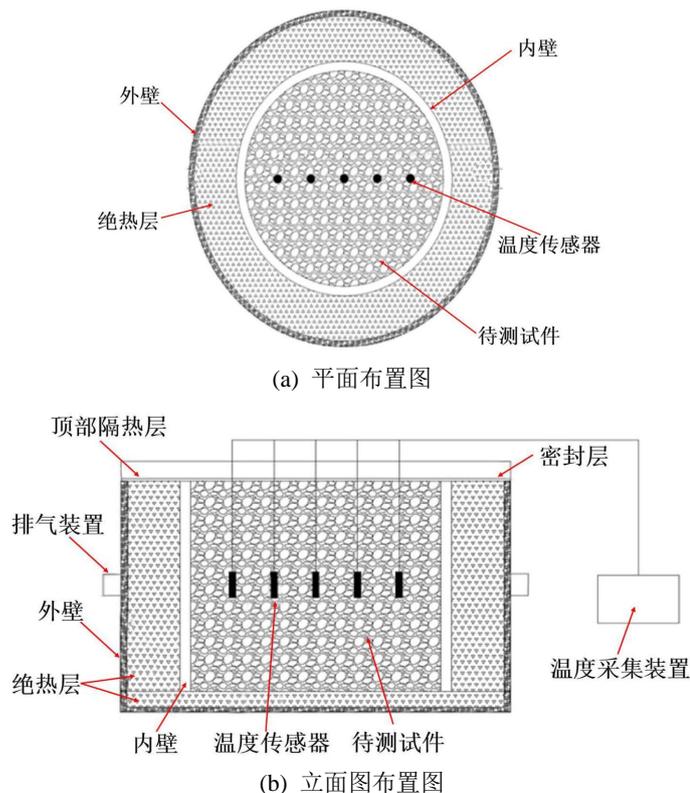


Figure 1. Schematic diagram of the cement paste hydration heat testing device  
图 1. 水泥浆体水化热测试装置示意图

通过该简易装置进行水化热温度数据的采集，从而来计算水泥浆体散热常数  $K$  和总热容  $C_p$ ，其计算公式如下：

$$K = (4.1816 \cdot M_w + C) \frac{\lg(\theta_1 - 20) - \lg(\theta_2 - 20)}{0.434\Delta T} \quad (1)$$

$$C_p = [C_c \times (M_c - M_w)] + M_w \times C_w + C \quad (2)$$

式中， $M_c$  和  $M_w$  分别表示为水泥浆体和加入水的质量， $C$  为热量计的热容量， $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别表示为试验 6 h 和 44 h 后热量计所测的温度， $\Delta T$  表示两者的时间差， $C_c$  和  $C_w$  分别表示为水泥浆体和水的比热容。

通过上式计算可以得到水泥浆体的散热系数和总热容，从而可以根据热量与温度之间的换算关系计算混凝土水化时的放热曲线，其换算公式如式(3)所示。

$$Q_t = C_p (T_t - T_0) + K \sum F \quad (3)$$

式中， $Q_t$  表示水泥水化时间段的总热量， $T_t$  和  $T_0$  分别表示  $t$  时刻和 0 时刻混凝土浆体的温度， $F$  为恒温线和水泥浆体温度曲线的面积。

## 2.2. 水泥水化放热速率模型建立

通过前文利用自制试验装置得到水泥浆体绝热温升和放热量之间的换算关系可以得到水化放热速率模型，该模型主要分为四个过程，即诱导过程、加速过程、减速过程和稳定过程[10]。可以利用这四个过程分阶段计算水化反应过程中的放热速率。

采用 1stOpt 软件，将水胶比( $W_{\text{水胶}}$ )和龄期( $\tau$ )作为自变量，水化放热速率( $V$ )作为因变量，同时考虑到预测结果的精度和实际工程需求，本文选择不同计算模型，可以得到一个最终的水化放热速率模型，其函数表达式如下所示：

$$V = \begin{cases} 0.24W_{\text{水胶}} + 0.63\tau - 0.84W_{\text{水胶}}\tau - 0.11 & 0 \leq \tau \leq \tau_{\text{诱}} \\ \frac{1}{3.61W_{\text{水胶}} + 0.12\tau} & \tau_{\text{诱}} \leq \tau \leq \tau_{\text{加}} \\ \frac{1}{-4.66W_{\text{水胶}}^{0.5} + 0.84\tau^{0.5} + 1.4} & \tau_{\text{加}} \leq \tau \leq \tau_{\text{减}} \\ \frac{1}{(2.33 - W_{\text{水胶}})^{20}} + \frac{1}{(3.04 - \tau)^2} & \tau_{\text{减}} \leq \tau \leq \tau_{\text{终}} \end{cases} \quad (4)$$

## 2.3. 热源函数及导热参数时变模型建立

查阅相关文献，张子明等人[11]提出了混凝土绝热升温与其反映速率有关的函数表达式，该表达式为双曲线函数。而本研究使用的是水泥浆体的水化放热过程来进行热源函数模型的计算，为了使通过水泥浆绝热温升获得的热源函数模型更贴近实际的混凝土热源函数模型，利用以下公式将水泥水化热与混凝土绝热温升关系的转换，得到其双曲线表达式为：

$$\theta = \frac{\theta_u V_\tau (t - t_0)}{1 + V_\tau (t - t_0)} \quad (5)$$

其中， $\theta_u = \theta_{\text{混}}(M_c/M_c + kM_{\text{mix}})$  为水泥水化与混凝土的关系映射， $\theta$  为不同阶段的绝热温升值， $\theta_u$  为最终的绝热温升值， $V_\tau$  为不同阶段的水化放热速率， $t$  和  $t_0$  分别为绝热温升开始和结束时间。

将水化放热速率模型中的水化放热速率  $V$  代入到式(5)中，便可以得到最终的混凝土的绝热温升模型，即最终的热源函数模型如下所示：

$$\theta = \begin{cases} \theta_u \left( 1 - \frac{1}{1 + (0.24W_{\text{水胶}} + 0.63\tau - 0.84W_{\text{水胶}}\tau - 0.11)t} \right), & 0 \leq \tau < \tau_{\text{诱}} \\ \frac{\theta_u t}{3.61W_{\text{水胶}} + 0.12\tau + t}, & \tau_{\text{诱}} \leq \tau < \tau_{\text{加}} \\ \frac{t}{t - 4.66W_{\text{水胶}}^{0.5} + 0.84\tau^{0.5} + 1.4}, & \tau_{\text{加}} \leq \tau < \tau_{\text{减}} \\ \theta_u \left( 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{(2.33 - W_{\text{水胶}})^{20}} + \frac{1}{(3.04 - \tau)^2} \right) t} \right), & \tau_{\text{减}} \leq \tau \leq \tau_{\text{终}} \end{cases} \quad (6)$$

此外，为了对现场大体积混凝土进行快速预测和分析其水化反应过程中的温度变化情况，需建立相应的混凝土水化仿真分析有限元模型，并将水化热热源函数模型、水泥浆导热系数时变模型及热边界交换条件输入模型进行计算。水化热热源函数模型可以依据前文所述的装置和相关公式推导建立；热边界交换条件则根据现场的实际环境因素确定；导热参数时变模型通过实验室试验进行标定。本文采用的导热参数时变模型函数表达式为双折线函数，具体表达式如下所示：

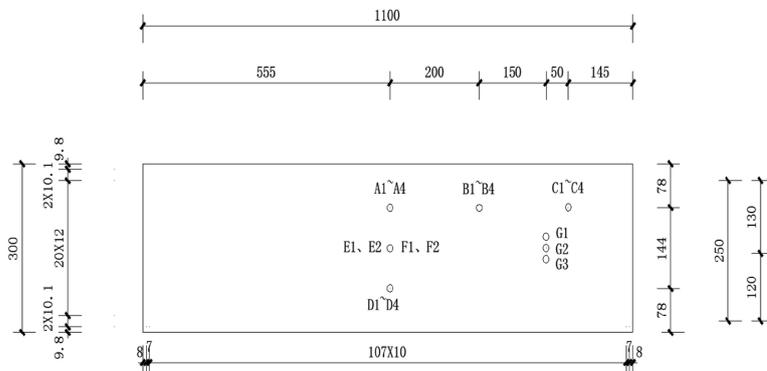
$$\lambda = \begin{cases} 1.31 - 2.4W_{\text{水胶}} + 0.003t - 0.014T + 0.709W_{\text{外}} & 0 \leq t \leq t_{\text{终凝}} \\ 1.519 \left[ 1 + 0.33e^{-(0.04t)^{0.35}} \right] \cdot [-0.469W_{\text{水胶}} + 0.573] \cdot [1.164 + 0.026T] & t_{\text{终凝}} \leq t \leq t_{\text{完}} \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\lambda$  为导热系数； $t$  为龄期； $W_{\text{水胶}}$  为水胶比； $T$  为养护温度； $W_{\text{外}}$  为外掺剂含量。

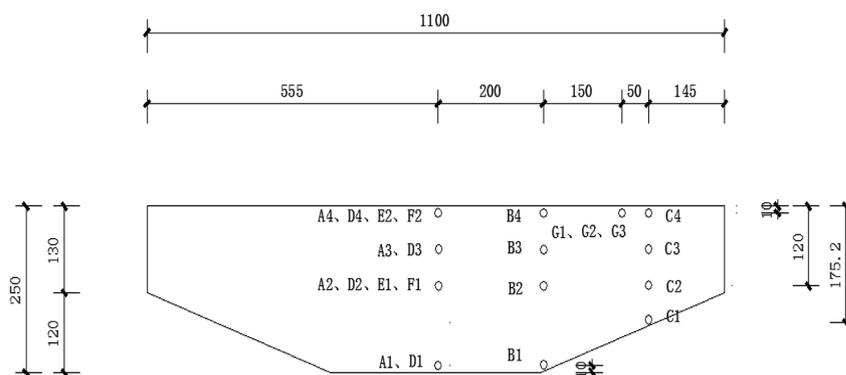
### 3. 大体积混凝土施工过程水化热预测分析与验证

#### 3.1. 工程介绍

为了验证本文提出的大体积混凝土水化预测方法的有效性，本文对比了该方法与传统经验公式所预测的热源函数及导热系数的数值模拟结果，并与现场实测结果进行了对照。为此，本文利用 Midas FEA 软件对碧水河某桥梁的一个桥墩大体积混凝土盖梁进行了数值模拟计算。该桥梁的跨径布置为 6 m × 45 m，浇筑的盖梁尺寸为 11 m × 3 m × 2.5 m，属于大体积混凝土，采用 C50 混凝土，并通过在盖梁内部布置冷凝管来控制水化过程中的温度。同时，在桥墩施工现场布置了温度传感器，以监测实际大体积混凝土水化过程中的温度，现场温度传感器的布置图见图 2 所示。



(a) 平面布置图

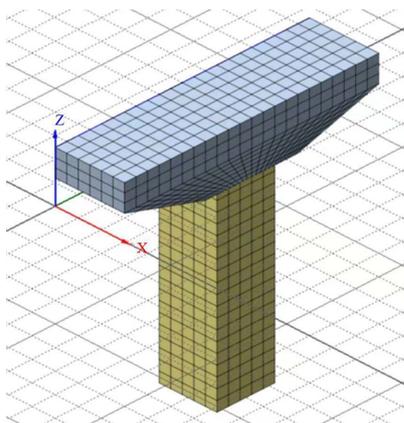


(b) 立面图布置图

**Figure 2.** Schematic diagram of temperature sensor arrangement  
**图 2.** 温度传感器布置示意图

### 3.2. 基于经验公式的盖梁水化热温度仿真计算

本次模型建立所选用的盖梁尺寸为  $11\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ，其各项物理力学参数如下表 1~3 所示，利用 MIDAS/FEA 建立有限元分析模型如图 3 所示。



**Figure 3.** Finite element analysis model  
**图 3.** 有限元分析模型

**Table 1.** Selection of concrete parameters

**表 1.** 混凝土参数选取

参数名称	单位	取值
比热	KJ/kgf·[C]	0.956
环境温度	℃	25
浇筑温度	℃	30
热传导率	KJ/m·hr·[C]	9.792
每立方米水泥量	kg/m <sup>3</sup>	388
热膨胀系数	/	$1.0e^{-0.05}$
泊松比	/	0.2
热源函数系数	/	$K = 55.68 \quad a = 1.4384$

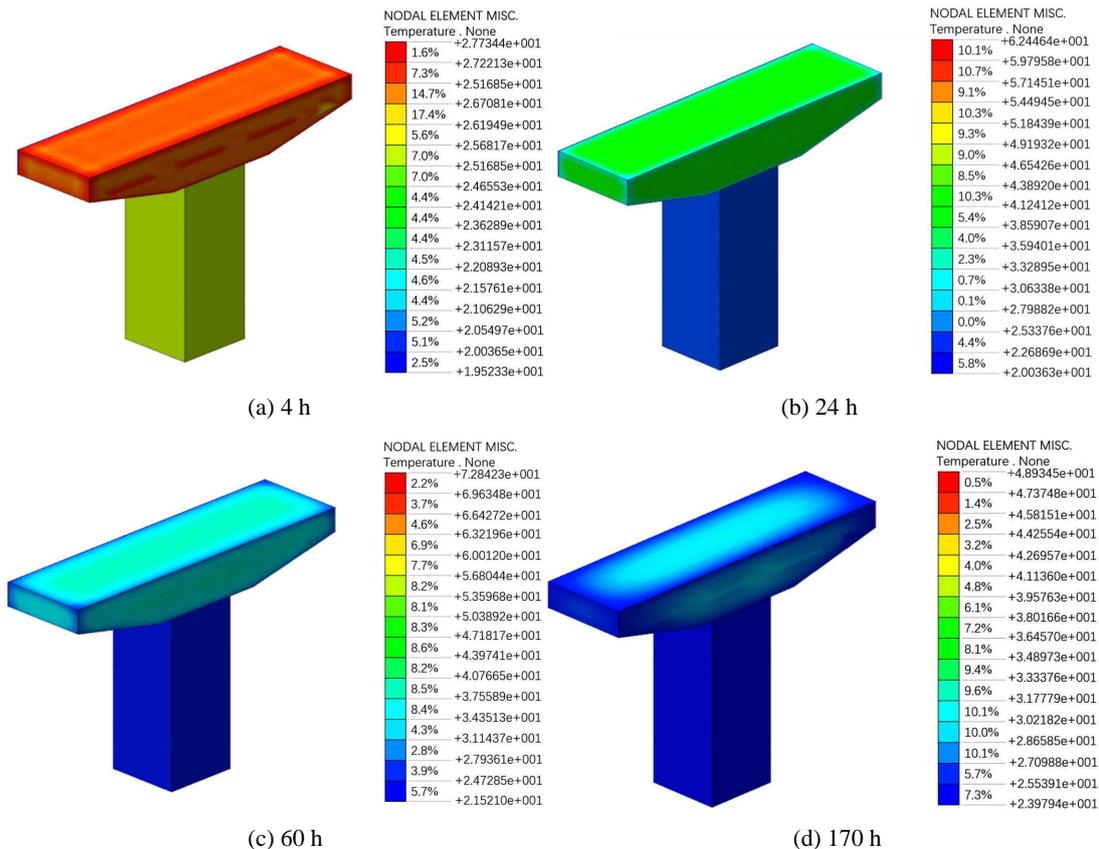
**Table 2.** Value of the convection coefficient for the cap beam  
**表 2.** 盖梁对流系数取值

对流系数位置	取值
顶	24
底	12
侧 - 钢模	38.24

**Table 3.** Values of the cooling pipe parameters for the cap beam  
**表 3.** 盖梁冷却管参数取值

参数名称	单位	取值
比热	KJ/kgf·[C]	4.186
容重	kgf/m <sup>3</sup>	1000
流入温度	°C	10
流量	m <sup>3</sup> /hr	1.5
管径	m	0.038
对流系数	kJ/m <sup>2</sup> ·hr·[C]	55

同时，按照传统的经验公式进行计算，其不同龄期阶段计算盖梁温度分布云图如图 4 所示。



**Figure 4.** Results of the hydration heat simulation analysis based on empirical formulas  
**图 4.** 基于经验公式的水化热仿真分析结果

由图 4 可知,在不同时间段混凝土盖梁内部的温度分布情况存在明显差异,在浇筑过程中,当在浇筑开始后的 40 h~80 h 内其混凝土内部的温度达到峰值区间,其内部最大温度峰值为 73℃。

### 3.3. 基于利用试验装置修正热源函数模型的盖梁水化热温度仿真计算

在本文中,提出了一种通过实验装置测试混凝土材料的绝热温升曲线的方法,并经过数学推导得到了一种修正的热源函数模型。将该模型数据导入 Midas FEA 软件后,绘制了相应的模型曲线(见图 5)。此外,根据热源函数模型中温度与龄期的关系以及导热函数时变模型中导热系数与龄期的关系,进一步推导出导热系数与温度之间的关系,如图 6 所示。

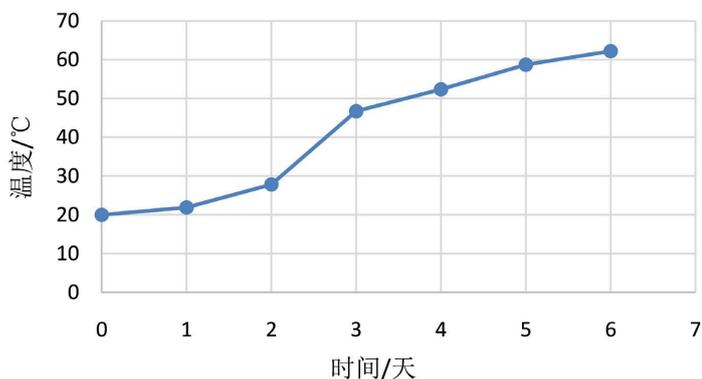


Figure 5. Corrected heat source function model  
图 5. 修正热源函数模型

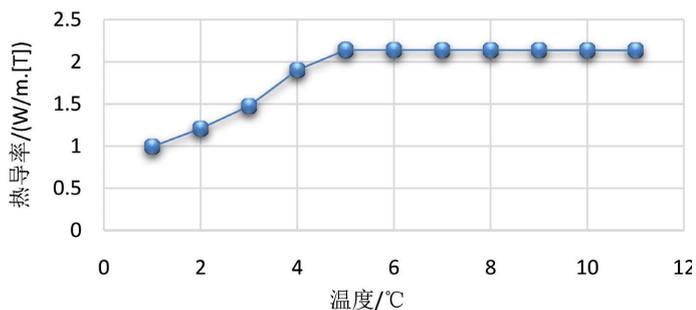
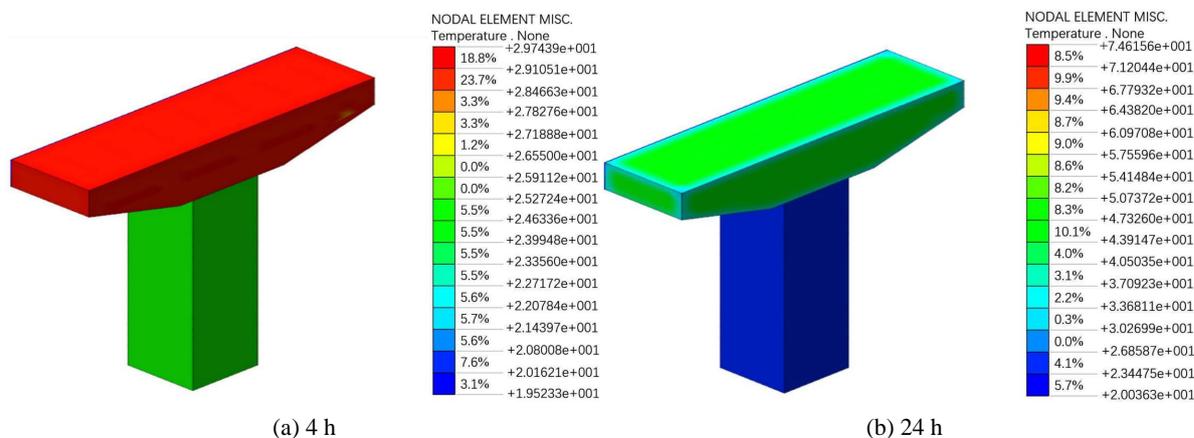
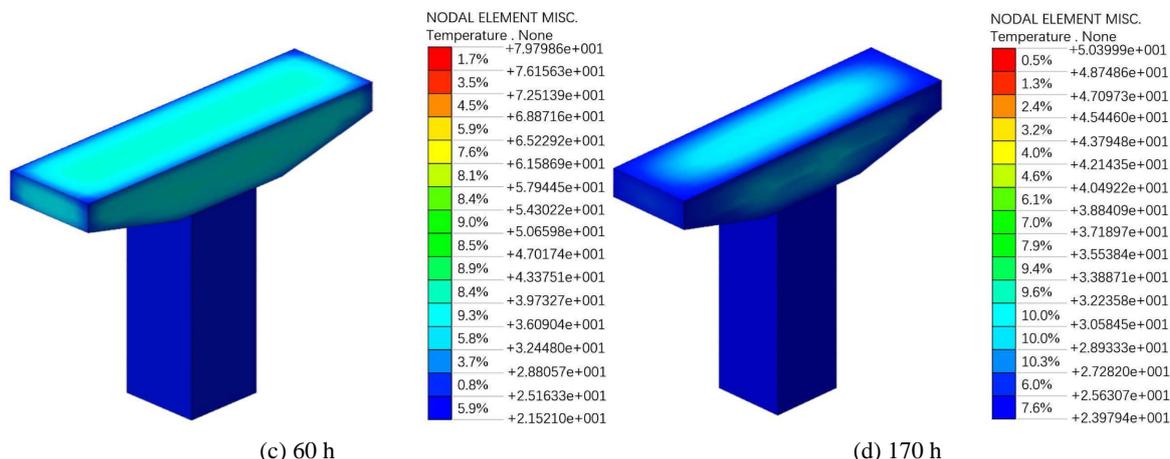


Figure 6. Thermal conductivity function curve  
图 6. 导热函数曲线





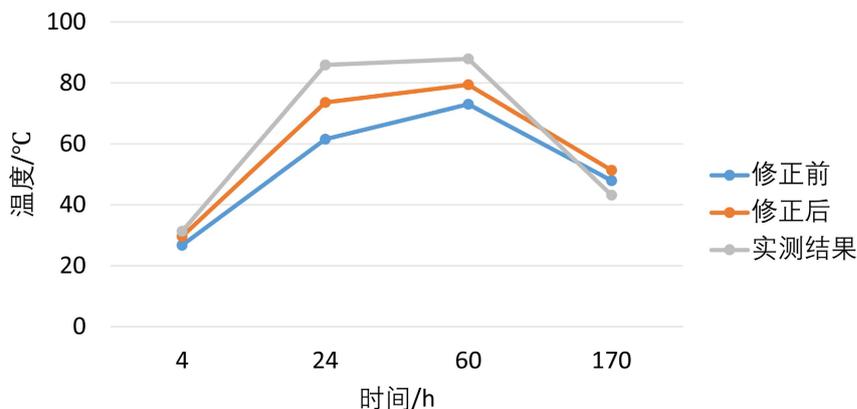
**Figure 7.** Results of the hydration heat simulation analysis based on the corrected heat source function model  
**图 7.** 基于修正热源函数模型的水化热仿真分析结果

本文提出的方法除热源函数和导热系数与经验公式不一致外，其他所有的参数均保持一致，建立有有限元仿真模型，计算结果如图 7 所示。

图 7 展示了在修正热源函数后，盖梁水化热仿真结果的温度场变化情况。该图表明，在不同时间段内，盖梁内部的温度场变化与经验公式的预测结果基本一致。然而，未修正热源函数和导热系数的有限元模拟结果与修正后的结果之间仍存在显著差距。在相同时间段内，修正后的水化温度明显高于未修正的结果。

### 3.4. 不同仿真结果与实测结果对比分析

为了对比分析修正热源函数和导热系数之后大体积混凝土温度场和未修正这些系数利用经验公式进行求解的结果与实测结果之间的差异性，本文提取了该盖梁在浇筑龄期为 4 h、24 h、60 h 和 170 h 时实际所测的温度场最大温度与模拟温度进行对比分析，结果见表 4 和图 8 所示。



**Figure 8.** Temperature variation comparison chart under different calculation methods  
**图 8.** 不同计算方式下温度变化对比图

从图 8 中可以观察到，实测温度结果显著高于理论计算结果。有限元模拟结果与实测结果的变化趋势基本一致，温度在约 60 小时左右达到峰值。对比传统经验公式计算的水化热结果，经过试验装置修正的热源函数和导热系数模型的计算结果与实测数据更加接近。未修正的经验公式模拟结果与实测温度之

间的最大误差达到 24.4℃。而经过修正的热源函数和导热系数模型的模拟结果将这种误差缩小了约 50%，对现场大体积混凝土浇筑过程中的温度控制具有重要的指导意义。

**Table 4.** Comparison table of simulated results before and after correction of temperature field for large-volume concrete cap beams versus measured results

**表 4.** 大体积混凝土盖梁温度场修正前后模拟结果与实测结果对比表

龄期(h)	修正前	修正后	实测结果
4	26.7	29.6	31.3
24	61.5	73.6	85.9
60	73.0	79.4	87.9
170	47.9	51.3	43.2

#### 4. 小结与讨论

本文主要利用基于半绝热法设计的一种自制水化热测定试验装置，对现场大体积混凝土的水化热进行预测与分析。通过该简易水化热测试装置测量实际配合比下混凝土的绝热温升曲线，进一步推导得到修正的热源函数模型。结合实验室标定的水泥水化过程中导热系数时变模型，对有限元分析模型进行修正，以提高其对实际情况的适应性，更加贴近实测水化热数据。同时，通过对现场大体积混凝土盖梁水化热数据的实测结果与有限元模拟结果进行对比分析，得出以下结论：

1) 实测大体积混凝土水化热结果与有限元模拟数据对比显示，水化热温度在不同龄期的变化趋势基本一致，且在 40~60 小时内达到温升峰值。因此，有限元分析可以有效替代现场实测，用于大体积混凝土温度控制的施工指导。

2) 对比利用简易装置修正前后热源函数和导热系数的有限元模拟结果与实测结果，发现未经修正的模型结果与实测数据存在较大误差，最大误差达到约 25℃。而修正后，模型结果在整体温度变化趋势保持不变的情况下，误差缩小了约 50%，这对控制大体积混凝土水化热产生的温度应力裂缝具有重要意义。

#### 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] 高原, 张君, 罗孙一鸣. 基于水泥水化度的混凝土早期力学性能发展预测[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 8.
- [3] 王彦丹, 李宗利. 考虑温度效应的界面层对混凝土热学参数影响分析[J]. 混凝土, 2021(2): 37-41.
- [4] Tang, S., Tang, C., Liang, Z., Zhang, Y. and Li, L. (2012) Numerical Study of the Influence of Material Structure on Effective Thermal Conductivity of Concrete. *Heat Transfer Engineering*, **33**, 732-747. <https://doi.org/10.1080/01457632.2011.635988>
- [5] 赵育. 高导热性混凝土微观数值模拟与工程应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [6] 李守巨, 范永思, 张德岗, 刘迎曦. 岩土材料导热系数与孔隙率关系的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 244-248.
- [7] Lu, X., Tong, F., Liu, G. and Guan, J. (2021) Model for Predicting the Thermal Conductivity of Concrete. *International Journal of Thermophysics*, **42**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02786-6>
- [8] Tang, S.W., Chen, E., Shao, H.Y. and Li, Z.J. (2015) A Fractal Approach to Determine Thermal Conductivity in Cement Pastes. *Construction and Building Materials*, **74**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.016>
- [9] 舒小娟, 宋健, 沈明燕, 等. 一种现场大体积混凝土水化热温度预测系统及方法[P]. 中国专利, CN202211013829.6. 2023-04-18.
- [10] 王成文, 王瑞和, 陈二丁, 彭志刚, 步玉环. 锂盐早强剂改善油井水泥的低温性能及其作用机理[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 140-144.
- [11] 张子明, 宋智通, 黄海燕. 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 1-6.