

大体积混凝土绝热温升表达式的推导与试验分析

董继红¹, 李占印²

(1. 盐城工学院 化学与生物工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:由固体热传导理论可知,大体积混凝土绝热温升仅与其中的水泥水化放热规律有关。在化学反应过程中,温度对化学反应速率的影响服从 Arrhenius 方程。因此,根据水泥恒温水化放热规律和水泥水化放热行为的温度效应,可以预测任意温度条件下任一时刻水化放热总量,进而推导出大体积混凝土绝热温升表达式。试验验证采用 10 mm 木胶板内衬 100 mm 聚苯乙烯泡沫板和 3 mm 胶合板模拟绝热状态。最后得出大体积混凝土绝热温升表达式可以用双曲函数或复合指数函数表达,而因双曲函数形式上要比复合指数函数简单,建议使用双曲函数表达式。

关键词:绝热温升;理论推导;试验验证;双曲函数;复合指数函数

中图分类号:TU528.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2010)02-0045-04

目前,混凝土绝热温升的拟合公式种类繁多,举不胜举,比较著名的有蔡正咏在文献[1]中提到的双曲函数模型为:

$$Q(t) = m \cdot t / (n + t) \quad (1)$$

朱伯芳院士在文献[2]中提出的指数模型为:

$$Q(t) = Q_0 \cdot [1 - \exp(-m \cdot t)] \quad (2)$$

朱院士致力于大体积混凝土温度控制方面的研究,在混凝土绝热温升表达式方面颇有建树,分别于1999年提出复合指数模型^[3],2003年又提出考虑温度影响的复合指数模型^[4]。

$$Q(t) = Q_0 \cdot [1 - \exp(-a \cdot t^b)] \quad (3)$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot [1 - \exp(-a \cdot T^b \cdot t^c)] \quad (4)$$

1 理论分析

混凝土各组分中只有水泥水化才产生反应热量,其他组分只是温度升高吸收部分热量。所以研究混凝土绝热温升规律也就是分析了水泥的水化放热规律,就可以利用固体的热传导理论分析混凝土绝热温升表达式。

1.1 热传导方程

根据固体热传导理论,混凝土体导热方程可以表达为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c} \\ a_c = \lambda_c / (c_c \rho_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_c 为混凝土导热系数, m^2/h ; λ_c 为混凝土导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; q 为单位体积混凝土中水泥水化在单位时间内放出的热量, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$; c_c 为混凝土比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_c 为混凝土密度, kg/m^3 。

在绝热条件下,混凝土导热方程可以简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q}{c_c \rho_c} \quad (6)$$

可见只要已知了水泥的水化放热规律,混凝土的绝热温升表达式可由积分得出。

1.2 水泥恒温水化放热方程

笔者在文献[5]中得出:水泥在20℃恒温条件下,水化放热方程为:

$$\begin{cases} Q_t = 2.74 \times t + 6.05, (0 < t < 6 \text{ h}) \\ Q_t = 94.66 \times \ln t - 146.5, (6 \text{ h} \leq t < 30 \text{ h}) \\ Q_t = 59.42 \times \ln t - 20.23, (30 \text{ h} \leq t < 672 \text{ h}) \end{cases} \quad (7)$$

1.3 温度对水泥水化放热规律的影响

在化学反应过程中,温度对化学反应速率的影响系数服从 Arrhenius 方程^[6]:

收稿日期:2010-05-10

作者简介:董继红(1977-),女,湖北红安人,讲师,硕士,主要研究方向为水泥化学、化工安全。

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (8)$$

式中: k 为化学反应速率常数; k_0 为指前因子; T 为绝对温度 K; E_a 为活化能 J/mol; R 为 Avogadro 常数 8.314 J/(K · mol)。

将上式取自然对数, 然后取微分得:

$$\frac{d(\ln k)}{dT} = -\frac{E_a}{RT^2} \quad (9)$$

将上式分离变量, 由 T_1 积分到 T_2 得:

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (10)$$

通过以上分析可以得出: 水泥矿物的活化能 E_a 决定了水化反应的温度影响因子。

笔者在已有的研究成果中得出: 在平均养护温度 20 °C ≤ t ≤ 60 °C 范围内, 本文试验用水泥活化 E_a 均值为 53 732 (J/mol), 标准差为 3 864 (J/mol), 变异系数为 0.072。以 20 °C 为水化基准温度, 假设水化速率为 k_{20} , 由公式(8)可以得出其在 30 °C、40 °C、50 °C、60 °C 养护条件下的水化速率分别为: 2.0 k_{20} 、3.9 k_{20} 、7.6 k_{20} 、14.0 k_{20} 。大体积混凝土中水泥的水化放热统一模型可表达为:

$$k = k_{20} \cdot \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + t}\right)\right] \quad (11)$$

1.4 基于等效时间的统一模型

1970 年, Bazant 教授根据 Arrhenius 方程提出了成熟函数, 用来计算相对于参考温度 T_r 的等效时间 t_e 。

$$t_e = \int_0^t \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{t + 273}\right)\right] dt \quad (12)$$

考虑温度测试的实际情况, 为了便于应用于数值分析, 等效时间公式(12)常常采用其离散形式:

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{t + 273}\right)\right] \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_i}{k_r}\right) \cdot \Delta t_i \quad (13)$$

引入等效龄期 t_e 的概念, 参考温度 T_r 为 20 °C, 那么, 水泥水化放热统一模型就可以表达为:

$$\begin{cases} Q_i = 2.74 \times t + 6.05, (0 < t < 6 \text{ h}) \\ Q_i = 94.66 \times \ln t - 146.5, (6 \text{ h} \leq t < 30 \text{ h}) \\ Q_i = 59.42 \times \ln t - 20.23, (30 \text{ h} \leq t < 672 \text{ h}) \\ t_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_i}{k_{20}}\right) \cdot \Delta t_i \end{cases} \quad (14)$$

1.5 数值解法

假设时间段 Δt 为 0.2 h, 每立方混凝土中水泥用量为 $M \text{ kg/m}^3$, 根据公式(6)和公式(14)可得:

- (1) 假设初始时刻混凝土温度为 t_0 ;
- (2) 第 i ($i > 0$) 个时间段 Δt_i 结束时:

$$\begin{cases} t_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{i-1}}{k_{20}}\right) \cdot \Delta t_i \\ q_i = M(Q_i - Q_{i-1}) \\ T_i = \frac{1}{c_s \rho_s} \sum q_i \end{cases} \quad (15)$$

2 理论值与试验值的对比研究

2.1 混凝土配合比

本文混凝土采用如下配合比(见表 1)。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion concrete kg/m^3

水泥	砂	石子	水
350	663	117 9	208

2.2 混凝土绝热温升试验

本文混凝土绝热温升试验块采用 0.8 m × 0.8 m × 0.8 m 试块; 模板采用 10 mm 木胶板内衬 100 mm 聚苯乙烯泡沫板和 3 mm 胶合板。试件放置在密闭的房间中, 在中心位置设置温度感应器和温度传感器, 连接温度记录仪。根据所确定的试验方案进行的混凝土中心温度测试结果如图 1。

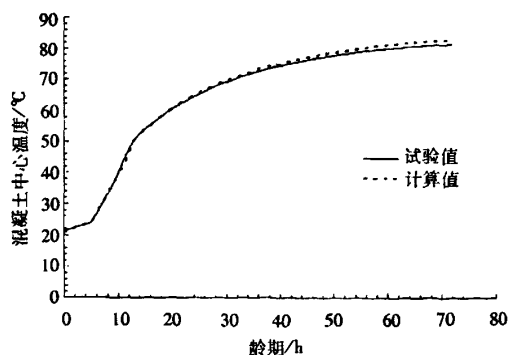


图 1 混凝土中心温度的计算值与试验值
Fig.1 Calculated value and test value of temperature at the cement centre

2.3 理论值的计算

本文 ρ_c 为 $2\,400\text{ kg/m}^3$, c_c 为混凝土比热 $0.967\text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 。由公式(15)可以计算混凝土的具体温度,当然可以编写简单的计算程序。计算结果如图1所示。

由图1可以看出:在 $8\text{ h}\sim 15\text{ h}$ 时试验值比计算值稍微偏高,对应于水泥水化过程的加速期阶段,此阶段随机性很大,相对而言其规律性最难求得;后期试验值比计算值偏低,可能是因为绝热试验方案并不能达到理论上的绝热状态,后期混凝土边界温度与环境温度差很大,不可避免的存在散热情况;混凝土后期温度增幅逐渐缩小,(最后将趋近于零), 3 d 龄期混凝土中心最高温升可达 $62.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 混凝土绝热温升表达式的拟合

分别按双曲函数、指数函数、复合指数函数、

对数函数拟合可以得出公式参数和相关系数(见表2)。 3 d 龄期前的拟合表达式曲线与试验值的关系见图2。

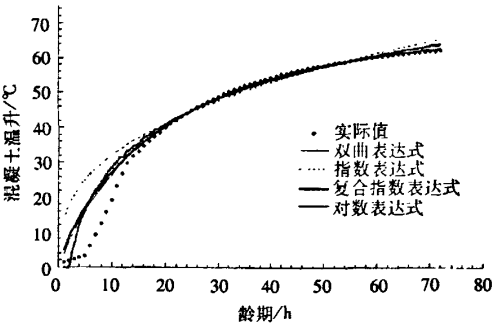


图2 4种类型表达式的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve on four type of expression (based on equivalent age)

表2 拟合公式与相关系数

Table 2 Fitting expression and correlation coefficient

拟合函数	$82.645 \times t/(t+21.19)$	$13.69 \times t^{0.3668}$	$67.86 \times [1 - \exp(-0.076 \times t^{0.827})]$	$18.2 \times \ln t - 13.533$
相关系数 r	0.996 96	0.980 07	0.998 72	0.992 08

由图2可以看出: 15 h 后的温升规律可以采用双曲函数和复合指数函数表达,只是双曲函数在形式上要比复合指数函数简单的多,所以多数人倾向于采用双曲函数表达式。

4 结论

(1)从理论分析和试验研究两个方面论证了混凝土的绝热温升曲线,理论分析模型与试验数据的差距很小。产生误差的原因可以归结为两个方面:其一,理论分析模型的参数取值稍有误差以及理论分析采用了假设“ 0.2 h 时间内产生的热量均匀分布在 0.2 h 时间内”。其二,试验模型的绝热模拟是采用的 10 mm 木胶板内衬 100 mm 聚

苯乙烯泡沫板和 3 mm 胶合板,虽然导热系数已经足够低,但依然达不到绝热的状态,而混凝土水化 3 d 时内外温差高达 $62.5\text{ }^\circ\text{C}$,因此散失的总热量还是不可忽略的。

(2)采用双曲函数和复合指数函数拟合混凝土的绝热温升曲线,吻合度都是很高的,尤其是 15 h 后的混凝土温升。只是对于 15 h 前的混凝土温升,计算值与试验值离差较大。如果要准确拟合,最好分段拟合。不过 15 h 前的混凝土温升对于测算混凝土的最高绝热温升作用不大,而最高绝热温升值对于大体积混凝土温度控制起关键作用,所以常常忽略早期混凝土温升的计算值与试验值离差较大的问题。

参考文献:

[1] 蔡正咏.混凝土性能[M].北京:中国建筑工业出版社,1979:164.
[2] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976:39.
[3] 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,1999:19.
[4] 朱伯芳.考虑温度影响的混凝土绝热温升表达式[J].水力发电学报,2003(2):69-73.
[5] 董继红,李占印. GB/T12959-2008《水泥水化热测定方法》中两种方法的联合应用[J].水泥,2010(5):62-63.
[6] 赵学庄.化学反应动力学原理[M].北京:高等教育出版社,69-73.

Theoretical Derivation and Experimental Research on Adiabatic Temperature Rise of Concrete

DONG Ji-hong¹, LI Zhan-yin²

(1. School of Chemical and Biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China;
2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: Based on the thermal conduction theory, adiabatic temperature rise of concrete has relations with the law of hydration heat of cement. During the course of chemical reactions, specific rate of reaction influenced by temperature submits to Arrhenius equation. According to the law of hydration heat of cement curing at isothermal temperature and effect of temperature on heat release behavior of hydration of cement tested by author, total hydration heat of cement curing at optional temperature can accurately. And then expression on adiabatic temperature rise of concrete was inferred in terms of theory. After that, using the 10mm wood glue board lining 100mm polystyrene foam board and 3mm plywood analogs adiabatic status, made a trial test. Finally, made a summary: hyperbolic function and complex exponential function can be used to express adiabatic temperature rise of concrete. In addition the hyperbolic function is simple in form than the complex exponential function, so author of this paper advises hyperbolic function expression.

Keywords: Adiabatic temperature rise; theoretical derivation; Trial; hyperbolic function; complex exponential function

(责任编辑: 沈建新; 校对: 张英健)

(上接第 17 页)

Application of Wavelet Technology in the Safety Evaluation of Topping Structures

ZHANG Ning-ning¹, WANG Meng², LI Jie²

(1. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;
2. Qing - Lai Freeway Road Management, Zibo City Highway Department, Shandong Zibo 256100, China)

Abstract: Topping structures face a big risk in the process of construction, so security monitoring is very important. However, the measured data affected by many complicated environmental factors usually include strong noises, which badly disturbs force analysis and prediction for construction. Therefore, both wavelet multi-scale technology and wavelet neural network technology are respectively used to eliminate the noises from measured data and set up prediction model. The results show that measured data after wavelet de-noising reflect practical force state, the prediction effect based on RBF neural network is better, and it has a good future in the field of engineering application.

Keywords: security monitoring; wavelet multi-scale; wavelet neural network; data de-noising; prediction model

(责任编辑: 沈建新; 校对: 张英健)