

# 混凝土温度相关热传导行为细观分析

张仁波, 金 浏, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 为了研究非均质混凝土的热传导行为, 考虑混凝土内部结构的非均质性及材料热工参数的温度相关性, 将混凝土视为骨料、砂浆和界面过渡区组成的三相复合材料, 建立二维/三维随机骨料细观数值模型. 在模型中, 砂浆与骨料热工参数的温度相关性通过拟合现有文献试验数据获得, 界面过渡区的参数则通过与试验结果对比反演得到. 基于此, 对混凝土热传导行为进行了细观有限元模拟. 模拟结果与试验结果吻合良好, 从而说明了该数值方法的合理性与准确性. 模拟结果表明: 考虑材料热工参数的温度相关性, 可以更准确地预测混凝土的宏观有效导热系数 (effective thermal conductivity, ETC) 及温度场; 骨料形状对有效导热系数的影响可忽略, 而由于导热系数的差异, 骨料类型的影响应该予以考虑; 混凝土有效导热系数随骨料体积分数增大而增大, 随温度升高而降低.

**关键词:** 混凝土; 热传导; 非均质性; 温度相关性; 有效导热系数; 温度场

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)12-1503-10

doi: 10.11936/bjutxb2017110007

## Mesoscopic Analysis of the Temperature-dependent Thermal Conduction Behavior Within Concrete

ZHANG Renbo, JIN Liu, DU Xiuli

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Considering the heterogeneity of concrete and temperature-dependency of materials, both 2D and 3D random aggregate structures of concrete were established to analyze the heat conduction behavior of heterogeneous concretes. In the numerical homogenization technique, concrete was regarded as a heterogeneous material consisting of three components, i. e., aggregate, mortar matrix and the interfacial transition zones (ITZs). The temperature-dependent thermal properties of mortar and aggregate were obtained based on the experimental data from the available literatures and those of the ITZ were determined by comparing the simulation results with measured values. The heat conduction equations were solved by using finite-element method. Good agreement between the present simulation results and available test observations illustrates the accuracy and reasonability of the developed approach. The simulation results indicate that not only the effective thermal conductivity (ETC) but also a more accurate temperature field of concrete can be obtained by the meso-scale simulation method considering temperature-dependency of materials' thermal properties. Aggregate shape has a negligible influence on the ETC of concrete while the effect of aggregate type cannot be ignored due to their different thermal conductivities. The ETC of concrete increases with increasing aggregate content while decreases when the

收稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0701100); 国家“973”计划资助项目(2015CB058000)

作者简介: 张仁波(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事混凝土结构方面的研究, E-mail: zhangrenbo99@126.com.

通信作者: 金 浏(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土材料与结构方面的研究, E-mail: kinglew2007@163.com

temperature increases.

**Key words:** concrete; heat conduction; heterogeneity; temperature-dependency; effective thermal conductivity; temperature field

混凝土的温度场是影响碳化、水分传输、氯盐传输与钢筋锈蚀等耐久性相关物理化学过程的重要因素之一<sup>[1]</sup>。另外,准确计算温度场是进行钢筋混凝土结构和构件抗火性能分析的基础。一方面,准确计算构件当前温度能够确定材料的相应力学性能;另一方面,准确计算构件截面上的温度增量有利于计算板截面应力增量。并且,在建筑结构节能降耗分析、大体积混凝土(如大坝等)、核反应防护设施等的温度应力计算中,同样需要准确确定其温度场。

混凝土的导热系数是表征其导热能力、确定温度场的关键参数。多年以来,国内外研究者在试验研究、理论分析与数值模拟方面做了大量的研究工作。在试验中,由于水分的存在会影响混凝土的导热性能,因此,一般采用瞬态方法来测量混凝土的导热系数<sup>[2]</sup>,包括热线法<sup>[3]</sup>、双线线性平行热探头法<sup>[4]</sup>、平面热源法<sup>[1]</sup>和防护热板法<sup>[1]</sup>等。试验结果表明,龄期、水灰比、骨料类型、骨料体积分数、温度、湿度和掺和料等因素均会影响混凝土的导热系数<sup>[1-7]</sup>。在试验研究的基础上,研究者提出了多种理论分析模型来预测混凝土的导热系数。早期的理论模型(如串联模型、并联模型、Maxwell模型和有效介质理论模型)多将混凝土视为二相复合介质,且假定各组分规则分布<sup>[8]</sup>。在此基础上,研究者提出了新的结构假设<sup>[9]</sup>,或考虑界面热阻效应<sup>[1,10]</sup>,发展了更加复杂的理论模型来更加准确地预测混凝土的导热系数。

实际上,混凝土的内部结构十分复杂,其物理/力学性质与其内部结构及组分分布密切相关<sup>[11]</sup>。与理论分析方法相比,数值模拟手段能够更加精细地描述混凝土的内部结构特征,从而更加合理地分析其热传导行为。采用 Weibull 分布假设<sup>[12]</sup>、计算机电镜扫描<sup>[11,13]</sup>或随机骨料模型<sup>[14]</sup>等方法描述混凝土的微/细观结构,研究者对混凝土中的热传导行为进行了二维<sup>[12,15]</sup>或三维<sup>[11,13-14]</sup>数值模拟。考虑到实际混凝土往往是带裂缝工作的,沈雷等<sup>[16]</sup>、任青文等<sup>[17]</sup>以等效塑性应变表征裂缝,采用串联模型获得开裂单元的有效导热性能,对开裂混凝土的热传导行为进行了细观数值研究,发现裂缝的存在阻碍了热量的传导。

上述研究多在室温(或常温)下进行,由于大多

数混凝土结构服役环境的温度范围为 $-20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因此这些研究极大地促进了对于混凝土热传导行为的认识。然而,对于火灾下的混凝土结构及部分特种混凝土结构(如核防护结构、热管等),需要承受更高的温度,从而表现出不同于常温的性能,因而需要了解混凝土在高温下的热工性能<sup>[18]</sup>。换言之,需要考虑混凝土热工性能的温度相关性。

鉴于此,本文从细观角度出发,考虑混凝土内部结构的非均质性及热工参数的温度相关性,将混凝土视为由骨料、砂浆和界面过渡区组成的三相复合材料,根据文献试验数据确定各细观组分在高温下的热工性能,采用细观数值方法确定高温下混凝土材料的宏观有效导热性能,对混凝土的导热行为进行分析,在此基础上探讨了相关因素的影响。

## 1 热传导行为基本理论

### 1.1 瞬态热传导控制方程

瞬态热传导行为的控制方程由能量守恒定律得出,其弱积分形式<sup>[19]</sup>为

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为材料密度; $V$ 为材料微元体积,其表面积为 $S$ ; $\dot{U}$ 为单位时间内的内能增量; $q$ 为热流密度; $r$ 为单位体积上外部提供的热量。

其本构关系通常写为比热容的形式,即

$$c(T) = \frac{dU}{dT} \quad (2)$$

式中: $c$ 为比热容; $T$ 为温度; $U$ 为内能。

热传导行为由 Fourier 定律控制,有

$$\mathbf{q} = -\boldsymbol{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}$ 为导热系数矩阵, $\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}(T)$ ,可以考虑为完全各向异性、正交各向异性或各向同性; $\mathbf{q}$ 为热流密度矩阵; $\mathbf{x}$ 为空间位置向量。

### 1.2 有限元离散化与时间积分

将式(3)代入式(1),采用标准 Galerkin 方法获得其变分形式如

$$\int_V \rho \dot{U} \delta T dV + \int_V \frac{\partial \delta T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta T r dV + \int_{S_q} \delta T q dS \quad (4)$$

式中  $\delta T$  为满足基本边界条件的任意变分场。

计算区域采用有限元法进行空间离散,其温度场插值函数为  $T = N^n(\mathbf{x})T^n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , 其中  $T^n$  为节点温度. 在 Galerkin 方法中,令变分场

$$\delta T = N^n \delta T^n$$

由此,式(4)的插值形式为

$$\delta T^n \left( \int_V N^n \rho \dot{U} dV + \int_V \frac{\partial N^n}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV \right) = \delta T^n \left( \int_V N^n r dV + \int_{S_q} N^n q dS \right) \quad (5)$$

并且,由于  $\delta T^n$  为任意量,因此

$$\int_V N^n \rho \dot{U} dV + \int_V \frac{\partial N^n}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V N^n r dV + \int_{S_q} N^n q dS \quad (6)$$

一般采用后差分法来求解式(6),即

$$\dot{U}_{i+\Delta t} = (U_{i+\Delta t} - U_i) / (\Delta t) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\frac{1}{\Delta t} \int_V N^n \rho (U_{i+\Delta t} - U_i) dV + \int_V \frac{\partial N^n}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV - \int_V N^n r dV - \int_{S_q} N^n q dS = 0 \quad (8)$$

有限元方法中采用修正 Newton-Raphson 法求解上述非线性方程组. 在计算求解过程中根据设定的最大温度变化量以及收敛性来自动调整时间步长  $\Delta t$ .

## 2 热工参数温度相关性

对混凝土热传导过程进行分析所需的热工参数包括:导热系数  $\lambda$ 、密度  $\rho$ 、比热容  $c$ . 目前,大多数研究者均在室温下测量混凝土材料的热工参数,然而,在高温下,材料中将产生温度应力,从而使材料内部产生损伤,进而改变其物理力学性能. 因而,材料的热工性能实际是具有温度相关性的.

### 2.1 导热系数

室温(25 °C)下,砂浆的导热系数一般在 0.7 ~ 1.1 W/(m·K) 内变化. Harmathy<sup>[20]</sup> 测量了水灰比分别为 0.25、0.33 和 0.50 的砂浆在不同温度下的导热系数,如图 1 所示. 由图 1 可知,400 °C 以下,砂浆的导热系数变化不大;超过 400 °C,砂浆的导热系数随温度升高而明显下降. Maraveas 等<sup>[21]</sup> 指出,可采用欧洲混凝土结构设计规范<sup>[22]</sup> 给出的混凝土导热系数下界计算公式来描述砂浆导热系数随温度的变化关系. 这里亦采用该公式来描述高温下砂浆导热系数与其室温下参考值的比率,即

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_{m,0}} = 1.026 - 0.103 \left( \frac{\theta}{100} \right) + 0.0043 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (9)$$

式中: $\lambda_m$  和  $\lambda_{m,0}$  分别为砂浆在高温下与室温下的导热系数, W/(m·K);  $\theta$  为温度, °C.

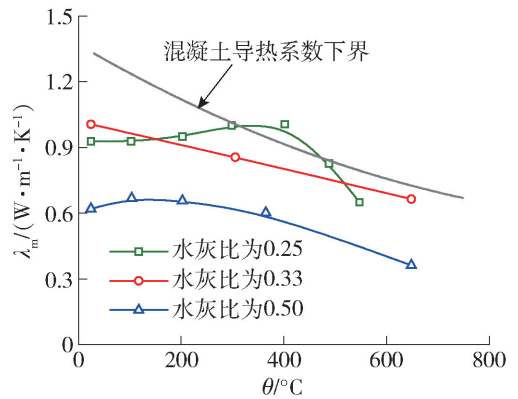


图 1 砂浆导热系数与温度的关系

Fig. 1 Relationship between thermal conductivity of mortar and temperature

另外,由于目前难以直接测量界面过渡区的物理力学参数,其导热系数同样采用式(9)进行描述.

Zoth 等<sup>[23]</sup> 总结了各类岩石导热系数随温度的变化,如

$$\lambda_a = \frac{770}{B(350 + \theta)} + 0.7 \quad (10)$$

式中: $\lambda_a$  为不同温度下岩石的导热系数; $B$  为与岩石类型相关的系数. 根据表 1 所列出的玄武岩、石灰岩、粉砂岩和石英岩的导热系数,可得出其对应的参数  $B$  的值分别为 0.62、0.84、0.26 和 0.73.

表 1 室温(25 °C)下微观组分的热工参数

Table 1 Thermal properties of meso-constituents at room temperature (25 °C)

微观组分	$\lambda /$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\rho /$ (kg·m <sup>-3</sup> )	$c /$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
骨料	石灰岩	3.15 <sup>a</sup>	2 690 <sup>a</sup>
	玄武岩	3.52 <sup>a</sup>	2 700 <sup>a</sup>
	粉砂岩	4.03 <sup>a</sup>	2 660 <sup>a</sup>
	石英岩	8.58 <sup>a</sup>	2 670 <sup>a</sup>
	0.40		
界面过渡区	0.70	1 125	906
	1.00		
砂浆	1.90 <sup>a</sup>	2 250 <sup>c</sup>	813 <sup>c</sup>

注:标有上标“a”的数据取自文献[3],标有上标“b”的数据取自文献[24],标有上标“c”的数据取自文献[18].

由此,根据式(9)(10)计算出砂浆和骨料导热系数与温度的关系曲线如图2所示.

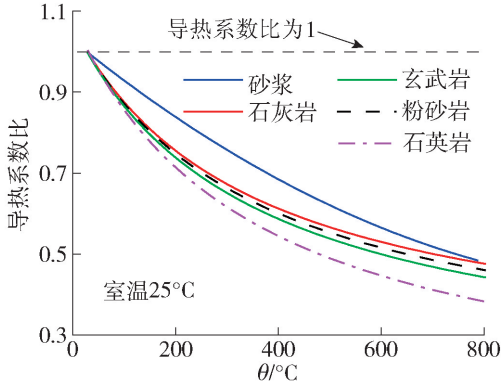


图2 砂浆和骨料细观组分高温与常温下导热系数比  
Fig. 2 Ratio between thermal conductivities of mortar and aggregates at high and room temperatures

## 2.2 比热容

如图3、4所示,Černý等<sup>[18]</sup>以及Vosteen等<sup>[24]</sup>分别测量了高温下砂浆与岩石的比热容.由图3、4明显可知,砂浆的比热容随温度升高而线性增大;而岩石的比热容与温度的变化关系是非线性的,这里采用幂函数来描述.因此,高温下砂浆与骨料的比热容

$$c_m = 790 + 0.9\theta \quad (11)$$

$$c_a = (1 + \theta)^{0.075} \quad (12)$$

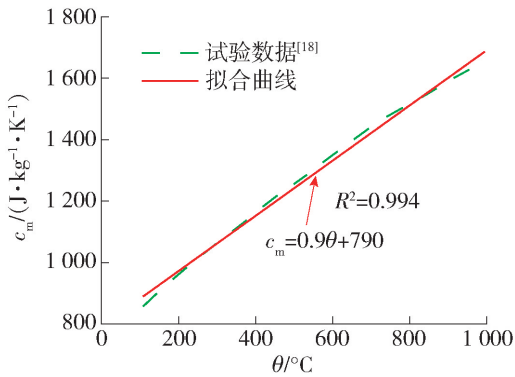


图3 砂浆比热容与温度的关系

Fig. 3 Relationship between specific heat capacity of mortar and temperature

## 2.3 密度

高温下,由于水分散失和组分化学变化,砂浆的固体质量会下降.Černý等<sup>[18]</sup>测量了高温下砂浆的质量损失,如图5所示.由图可知,砂浆质量损失与温度的关系可采用分段函数来描述.由此可知,高温下砂浆的密度( $\rho_m$ )与室温参考值( $\rho_{m,0}$ )的比值为

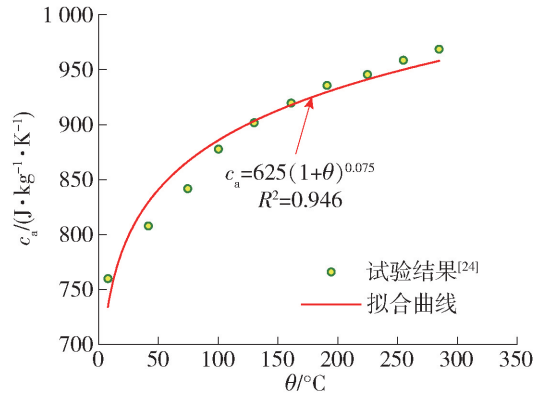


图4 岩石比热容与温度的关系

Fig. 4 Relationship between specific heat capacity of rock and temperature

$$\frac{\rho_m}{\rho_{m,0}} = \begin{cases} 0.996 - 1.25 \times 10^{-4}\theta, & \theta \leq 630 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.603 - 7.5 \times 10^{-4}\theta, & 630 \text{ } ^\circ\text{C} < \theta \leq 725 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.876 - 3 \times 10^{-5}\theta, & \theta > 725 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (13)$$

此外,由于岩石的热膨胀系数非常小,这里与Vosteen等<sup>[24]</sup>的工作相同,暂不考虑高温下骨料的质量损失,假定升温过程中骨料的密度为常数.

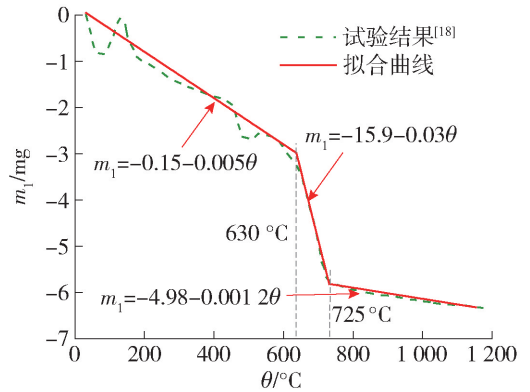


图5 高温下砂浆的质量损失

Fig. 5 Mass loss of mortar under high temperatures

## 3 细观数值模型

随机骨料模型是一种描述混凝土细观结构的典型的唯像模型,可表征骨料颗粒在空间的随机分布情况,概念比较清晰,常被用来研究混凝土的细观断裂破坏行为、宏观力学性能及扩散性能等<sup>[25-27]</sup>.本文为简便起见,将骨料设为圆形(球形),采用Monte Carlo方法<sup>[25-27]</sup>建立混凝土随机骨料模型,如图6所示.图6中,二维模型的骨料体积分数为47%,特征粒径取为6、8、10、14 mm;三维模型的骨料体积分数为35%,等效特征粒径分别为15、30 mm.与文献

[26]相同,界面过渡区厚度取为 0.5 mm,平均网格尺寸为 0.5 mm.

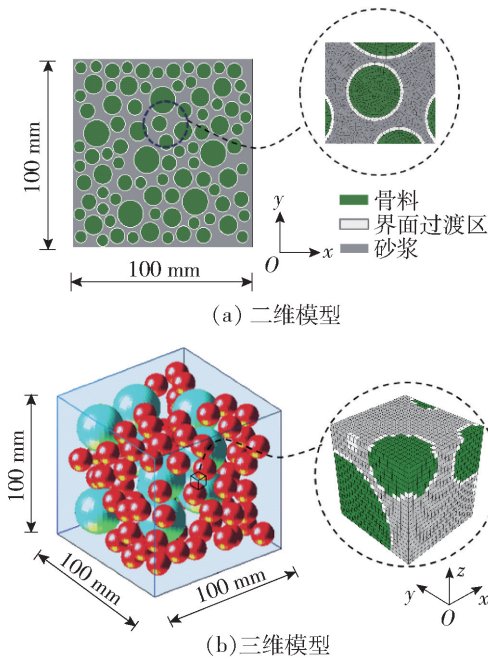


图6 混凝土热传导行为微观数值分析模型

Fig. 6 Meso-scale models for the study of heat conduction in concrete

室温下,混凝土各细观组分的热工参数见表1. 由于缺少界面过渡区热工性能的实测数据,因此采用3组参数进行试算,将细观数值方法所得的混凝土的宏观有效导热系数与 Khan<sup>[3]</sup>的试验结果进行对比,从而选取合适的参数. 在试算中,界面过渡区的导热系数 $k_{i,0}$ 分别为0.40、0.70、1.00 W/(m·K) (与砂浆导热系数 $\lambda_{m,0}$ 的比值 $\lambda_{i,0}/\lambda_{m,0}$ 分别为0.21、0.37、0.53). 考虑到界面过渡区实际上是一种多孔近场砂浆,其孔隙多充满空气,其密度与比热容简单取为砂浆与空气二者的平均值. 高温下混凝土各细观组分的热工性能按照第2节内容选用.

## 4 有效导热系数

### 4.1 计算方法与验证

为了获得混凝土试件的宏观有效导热系数,考虑如图7所示的一维热传导过程. 在图7(a)中,试件的上下两边边界分别设为恒定温度 $T_1$ 和 $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ); 2个侧边设为隔热边界,即假定2个侧边不会与外界发生能量交换. 由于 $T_1 > T_2$ ,试件内部将产生热流. 达到稳态后,对于均质材料,其内部的热流密度处处相同(见图7(a)). 根据 Fourier 定律,试件的宏观有效导热系数 $\lambda_e$ 可表示为<sup>[14,17]</sup>

$$\lambda_e = \frac{q}{(T_1 - T_2)/L} \quad (14)$$

式中: $q$ 为宏观热流密度; $L$ 为试件的沿热传导方向的长度.

对于非均质材料或复合材料,其内部的热流密度分布亦是非均匀的,如图7(b)所示. 因而需要采用均匀化方法来计算其宏观有效导热系数<sup>[14]</sup>,有

$$\lambda_e = \frac{q}{(T_1 - T_2)/L} = \frac{qA}{A(T_1 - T_2)/L} = \frac{q \sum_{i=1}^n a_i}{A(T_1 - T_2)/L} = \frac{\sum_{i=1}^n qa_i}{A(T_1 - T_2)/L} \quad (15)$$

式中: $A$ 为二维试件的面积; $a$ 为第 $i$ 个微元的面积; $n$ 为微元总数. 对于有限元方法来说,微元可取为单元,则有

$$\lambda_e = \frac{\sum_{i=1}^n q_i a_i}{A(T_1 - T_2)/L} \quad (16)$$

式中 $q_i$ 为第 $i$ 个单元的热流密度.

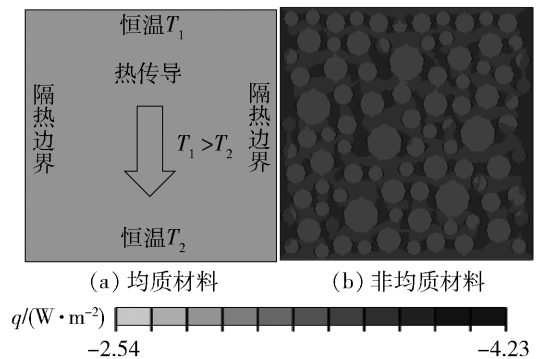


图7 有效导热系数 $\lambda_e$ 计算示意图

Fig. 7 Schematic for the calculation of effective thermal conductivity  $\lambda_e$

因此,当考虑材料热工性能的温度相关性时,混凝土的宏观有效导热系数是受 $T_1$ 和 $T_2$ 影响的<sup>[14]</sup>. 在本文中,计算温度 $T$ 下的有效导热系数时,二者分别近似取为 $T_1 = T + 0.1$  K,  $T_2 = T$ .

为了验证本文的数值方法,对 Khan<sup>[3]</sup>的试验进行稳态细观尺度模拟,根据式(16)计算混凝土的宏观有效导热系数,并与测量值进行对比. 在 Khan 的试验中,混凝土水灰比为0.60,共采用4种骨料(即玄武岩、石灰岩、粉砂岩和石英岩),骨料体积分数均为47%,相关参数见表1. 数值模拟所得的混凝土有效导热系数与试验结果的对比如图8所示. 另外,图8亦给出了几种经典理论模型<sup>[8]</sup>(即并联模型、串联模型、Maxwell模型和有效介质理论)的计

算结果. 由图 8 可知, 当界面过渡区的导热系数  $\lambda_{i,0}=0.70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  时, 细观数值结果与试验结果吻合良好, 从而说明了该细观数值方法的合理性与准确性. 另外, 由图 8 可知, 与试验结果相比, 除 Hassenlman-Johnson (H-J) 模型<sup>[10]</sup> 能够较好地预测混凝土的宏观有效导热系数外, 其他理论模型给出的结果均明显偏大. 这是由于这些理论模型均为二相模型, 没有考虑界面过渡区的影响, 而 H-J 模型是在 Maxwell 模型<sup>[28]</sup> 的基础上引入了界面热阻效应, 即

$$\lambda_e = \lambda_2 \frac{\lambda_1(1+2\beta) + 2\lambda_2 + 2f[\lambda_1(1-\beta) - \lambda_2]}{\lambda_1(1+2\beta) + 2\lambda_2 - f[\lambda_1(1-\beta) - \lambda_2]} \quad (17)$$

式中:  $f$  为夹杂相 (这里为骨料) 的体积分数;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为骨料和砂浆的导热系数;  $\beta$  为界面热阻系数, 与骨料类型、界面粗糙程度、砂浆的组分有关<sup>[11]</sup>, 这里对于含有表 1 中骨料的混凝土,  $\beta = 0.226$ .

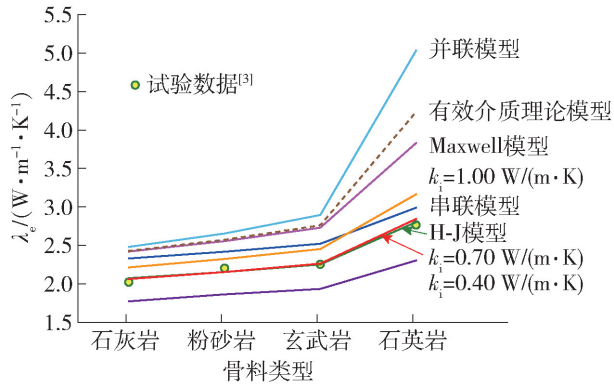


图 8 试验研究、理论分析与本文数值方法所得的混凝土有效导热系数的对比

Fig. 8 Comparison of the experimental data, theoretical results and the present numerical observations on effective thermal conductivity of concrete

## 4.2 骨料形状的影响

为了研究骨料形状的影响, 以石灰岩骨料为例, 取其体积分数为 35%, 分别将其形状设为圆形、椭圆形和方形, 其他参数保持一致, 对混凝土试件的宏观有效导热系数进行细观数值模拟计算, 其结果如图 9 所示. 可知, 在各温度下, 3 种形状的骨料所得的结果仅表现出很微小的差异. 该差异一方面可归因于混凝土细观结构本身的非均质性; 另一方面是由于对于 3 种形状的骨料, 界面过渡区的厚度相同, 导致界面过渡区总体积分数随骨料形状不同而发生变化, 从而对混凝土中的热传导行为产生一定影响.

尽管如此, 仍可认为骨料形状对混凝土宏观有效导热系数的影响可以忽略.

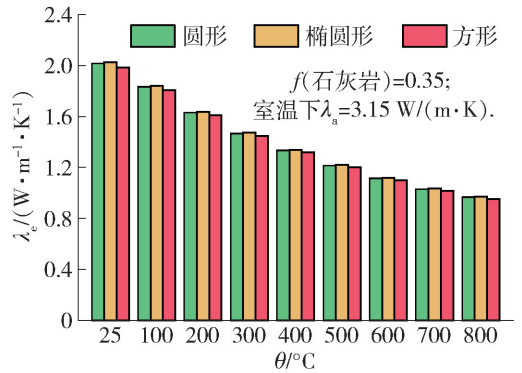


图 9 骨料形状对高温下混凝土试件有效导热系数的影响  
Fig. 9 Effect of aggregate shape on effective thermal conductivity of concrete specimens under high temperatures

## 4.3 骨料类型的影响

在实际工程中, 往往就近取材配制混凝土, 特别是粗骨料, 大多采用当地的材料. 为了分析骨料类型的影响, 对分别含有玄武岩、石灰岩、粉砂岩和石英岩这 4 种骨料的混凝土中的热传导行为进行细观数值计算. 计算中骨料设为圆形, 其体积分数取为 47%, 各细观组分的热工参数见表 1, 计算所得混凝土宏观有效导热系数随温度的变化如图 10 所示. 由图 10 可知, 含有不同骨料的混凝土的宏观有效导热系数随温度的变化趋势大致相同, 而其数值相差很大. 具体而言, 骨料的导热性能越好, 由其配制成的混凝土的有效导热系数越大. 因而, 骨料类型显著影响混凝土的宏观有效导热系数.

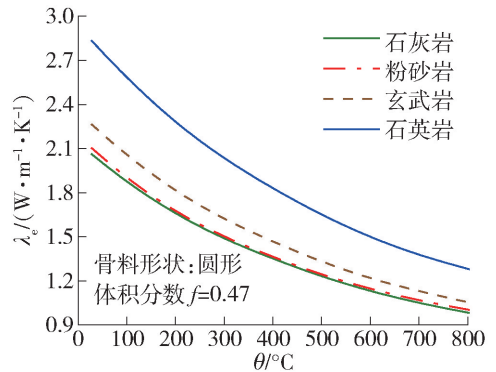


图 10 骨料类型对混凝土试件有效导热系数的影响  
Fig. 10 Effect of aggregate types on effective thermal conductivity of concrete specimens

## 4.4 骨料体积分数的影响

以圆形石灰岩骨料为例, 对 25 ~ 800 °C 范围内 5 种骨料体积分数 (0.10、0.20、0.35、0.47、0.60) 下

混凝土的宏观有效导热系数进行细观数值计算, 结果如图 11 所示. 可知, 骨料体积分数一定时, 混凝土有效导热系数随温度升高而降低. 而当温度一定时, 混凝土的有效导热系数随骨料体积分数增大而增大. 这是因为在混凝土的细观组分中, 骨料的导热系数最大, 因而, 混凝土中骨料体积分数越大, 其宏观导热性能越好, 这与 Kim 等<sup>[4]</sup>的结论一致.

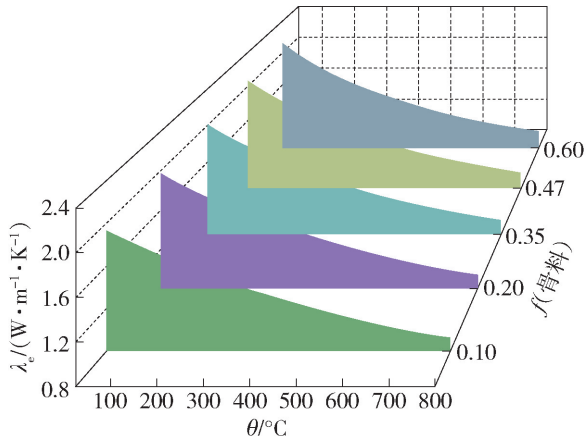


图 11 不同骨料体积分数下混凝土试件的有效导热系数

Fig. 11 Effective thermal conductivity of concrete specimens with different aggregate contents

## 5 温度场模拟

为了更好地理解混凝土的热传导行为, 采用 ISO 834-1<sup>[29]</sup> 建议的标准升温曲线 (见图 12), 基于前述细观数值方法对混凝土的温度场瞬态分析. 首先对 Peng<sup>[30]</sup> 所测得的混凝土温度场进行模拟. 在 Peng<sup>[30]</sup> 的试验中, 混凝土骨料体积分数为 64.8%, 水胶比为 0.26, 90 d 抗压强度达 115 MPa. 保持相关热工参数与试验数据一致, 在 ISO 834-1 标准升温曲线下, 混凝土内部 4 个测点的温度-时间曲线如图 13 所示. 由图 13 可知, 细观数值模拟结果与试验测量数据吻合良好, 从而再次说明了本文细观数值方法的合理性与准确性.

基于此, 对高温作用下混凝土中的温度场进行二维与三维模拟. 在二维模拟中, 在试件的上表面及 2 个侧面施加温度荷载, 而在三维模拟中仅在试件表面施加温度荷载, 其他边界视为隔热边界而不与外界发生热量交换. 作为对比, 对考虑与不考虑热工参数温度相关性 2 种情形分别进行宏观与细观数值模拟, 因而共有 4 种工况的二维模拟结果. 在细观数值分析中, 材料参数如表 1 所示. 宏观模拟中材料的有效热工参数采用第 4 节的方法计算. 升

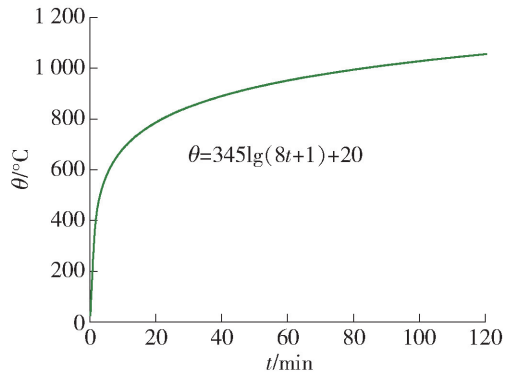


图 12 ISO 834-1 标准时间-温度曲线

Fig. 12 ISO 834-1 standard time-temperature curve

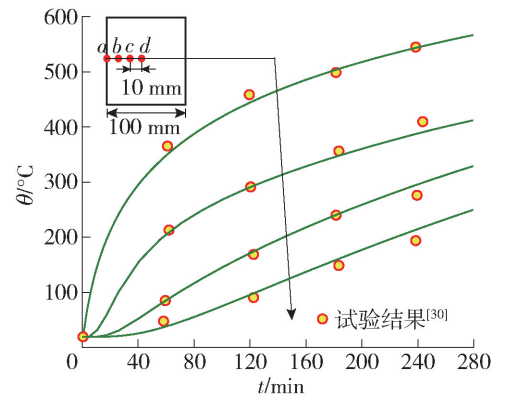


图 13 温度场模拟结果与试验结果的对比

Fig. 13 Comparison of the simulated and measured temperature fields

温 1 h 后, 其三维模拟结果见图 14, 4 种工况的二维模拟结果见图 15 ~ 17.

### 5.1 三维数值结果

如图 14 所示, 细观数值模拟所得的混凝土内部距受热面相同深度处的热流密度与温度并不相同, 这体现了模拟热传导行为时考虑混凝土细观非均质性的重要性. 另外由图 14 可知, 界面过渡区的热流密度小于骨料与砂浆处, 说明由于导热系数较小, 界面过渡区的存在在一定程度上阻碍了热量的通过, 这亦说明了分析混凝土热传导行为时考虑界面过渡区的必要性与重要性.

### 5.2 宏/细观结果对比

观察图 15 ~ 17 可以进一步发现宏观与细观数值结果的差异. 在图 15 中, 宏观数值模拟所得的热流密度等值线是连续的, 而细观模拟结果中, 热流密度等值线在界面过渡区处是间断的, 再一次表明了界面过渡区的热阻效应. 宏/细观模拟所得温度场 (见图 16) 的差异表现在, 宏观结果温度等值线更加光滑. 由于混凝土细观组分导热性能的差异, 细观

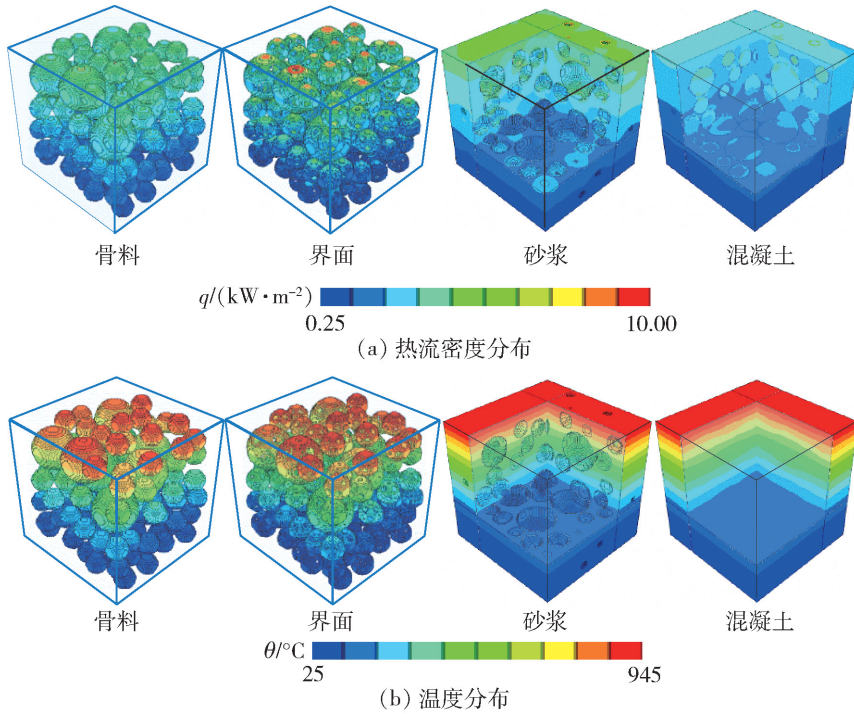


图 14 三维细观数值模拟结果

Fig. 14 Three-dimensional meso-scale simulation results

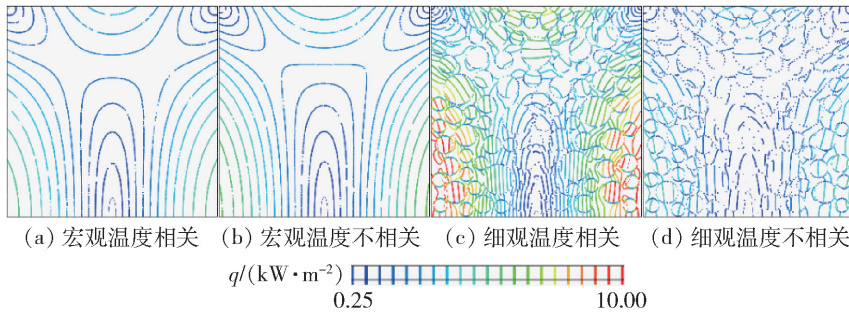


图 15 三边受火 1 h 后混凝土内的热流密度分布

Fig. 15 Heat flux distribution within concrete specimens after three-side fire exposure for one hour

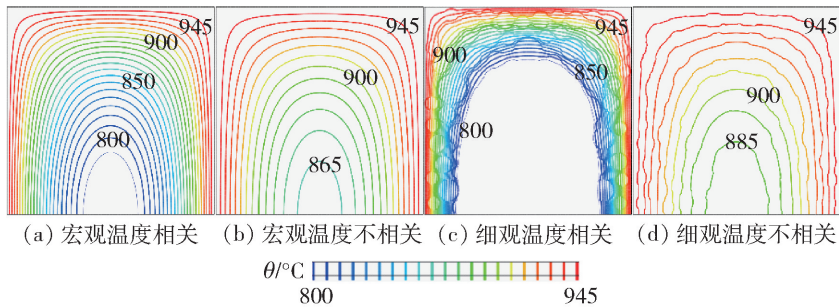


图 16 三边受火 1 h 后混凝土内的温度场

Fig. 16 Temperature field within concrete specimens after three-side fire exposure for one hour

结果温度等值线相对曲折。由图 17 明显可知,宏/细观模拟所得的温度值亦相差较大。因此,为了准确把握混凝土的导热行为,其细观结构的非均质性不能忽视。

另外,由图 15 ~ 17 可知,考虑材料热工参数的

温度相关性时,模拟所得的热流密度分布与温度场更加不均匀,可以明显观察到骨料与砂浆二者导热性能的差异。并且,由图 17 可知,不考虑材料热工参数的温度相关性计算所得的温度偏高,从而会过度估计温度导致的混凝土力学性能退化,其结果偏



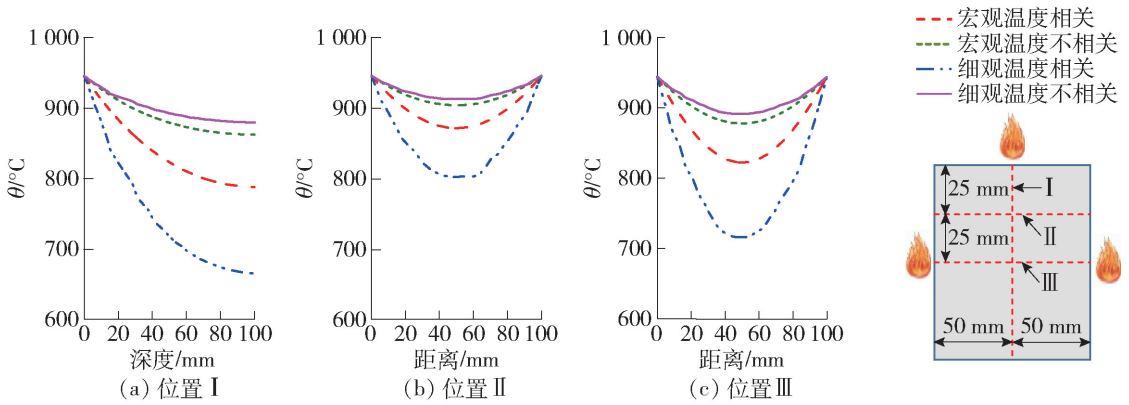


图17 三边受火1h后混凝土试件内的温度变化曲线

Fig. 17 Temperature variation curves within concrete specimen after three-side fire exposure for one hour

保守。

综上所述,与考虑界面热阻效应的理论分析模型(如H-J模型<sup>[10]</sup>)相比,本文的微观数值模拟方法在考虑材料热参数温度相关性的基础上,不仅可以准确预测高温下混凝土的宏观有效导热系数,还可以更加准确地获得其内部温度场,从而更加全面地把握非均质混凝土的热传导行为。

## 6 结论

1) 与试验结果的良好吻合说明了本文微观数值方法的合理性与准确性。

2) 考虑材料热工参数温度相关性的微观数值模型可以更准确地获得混凝土的宏观有效导热系数与内部温度场。

3) 骨料形状对混凝土有效导热系数的影响可忽略;由于导热性能的差异,骨料类型明显影响混凝土的有效导热性能。

4) 混凝土的宏观有效导热系数随骨料体积分数增大而增大,随温度升高而减小。

需要说明的是,本文仅进行了一些初步探索。为了更加全面准确地理解混凝土的热传导行为,在混凝土微观组分影响的基础上,其他因素(如混凝土内部的孔隙与微裂缝等初始缺陷<sup>[9,14]</sup>、力学损伤<sup>[17]</sup>与饱和度<sup>[1]</sup>等)的影响需要进一步考虑。

## 参考文献:

[1] ZHANG W, MIN H, GU X, et al. Mesoscale model for thermal conductivity of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 8-16.

[2] TANGTERMSIRIKUL S, CHOKTAWEEKARN P, SAENGSOY W. A model for predicting thermal conductivity of concrete [J]. Magazine of Concrete

Research, 2009, 61(4): 271-280.

- [3] KHAN M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models [J]. Building and Environment, 2002, 37(6): 607-614.
- [4] KIM K, JEON S, KIM J, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 363-371.
- [5] SENGUL O, AZIZI S, KARAOSMANOGLU F, et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2/3): 671-676.
- [6] LO MONTE F, GAMBAROVA P G. Thermo-mechanical behavior of baritic concrete exposed to high temperature [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 53: 305-315.
- [7] UYSAL H, DEMIRBOĞA R, ŞAHİN R, et al. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 845-848.
- [8] KADDOURI W, EL MOUMEN A, KANIT T, et al. On the effect of inclusion shape on effective thermal conductivity of heterogeneous materials [J]. Mechanics of Materials, 2016, 92: 28-41.
- [9] WANG J, CARSON J K, NORTH M F, et al. A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9/10): 2389-2397.
- [10] HASSENLMAN D P H, JOHNSON L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance [J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(6): 508-515.
- [11] WU T, TEMIZER I, WRIGGERS P. Computational

- thermal homogenization of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1): 59-70.
- [12] TANG S, TANG CA, LIANG Z, et al. Numerical study of the influence of material structure on effective thermal conductivity of concrete [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2012, 33(8): 732-747.
- [13] CHUNG S, HAN T, KIM S, et al. Evaluation of effect of glass beads on thermal conductivity of insulating concrete using micro CT images and probability functions [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65: 150-162.
- [14] CHEN J, WANG H, LI L. Determination of effective thermal conductivity of asphalt concrete with random aggregate microstructure [J/OL]. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(12): 04015045 [2018-09-29]. [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001313](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001313).
- [15] HUSSAIN M, AHMAD S, TAO W Q. Lattice Boltzmann modeling of the effective thermal conductivity for complex structured multiphase building materials [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1119: 694-699.
- [16] 沈雷, 任青文, 张林飞, 等. 开裂混凝土有效导热系数研究: 三维模拟与试验验证 [J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 689-701.
- SHEN L, REN Q W, ZHANG L F, et al. Study of effective thermal conductivity of cracked concrete: three-dimensional simulation and experimental validation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 689-701. (in Chinese)
- [17] 任青文, 沈雷, 孙立国, 等. 开裂混凝土有效导热系数的微观数值研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(8): 892-899.
- REN Q W, SHEN L, SUN L G, et al. Numerical study of the influence of cracks on effective thermal conductivity of concrete in meso-scale [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 892-899. (in Chinese)
- [18] ČERNÝ R, MADĚRA J, PODĚBRADSKÁ J, et al. The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(8): 1267-1276.
- [19] Dassault Systèmes Simulia Corp. *ABAQUS theory manual*, version 6.14 [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes, 2014: 301-305.
- [20] HARMATHY T Z. *Properties of building materials at elevated temperatures* [R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1983: 20-25.
- [21] MARAVEAS C, WANG Y C, SWAILES T. Thermal and mechanical properties of 19th century fireproof flooring systems at elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 248-264.
- [22] European Committee for Standardization. *EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design* [S]. London: British Standards Institution, 2004: 28-29.
- [23] ZOTH G, HÄNEL R. Appendix [M] // HAENEL R, RYBACH L, STEGENA L. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 449-468.
- [24] VOSTEEN H, SCHELLSCHMIDT R. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C)*, 2003, 28(9/10/11): 499-509.
- [25] 杜修力, 韩亚强, 金浏, 等. 骨料空间分布对混凝土压缩强度及软化曲线影响统计分析 [J]. *水利学报*, 2015, 46(6): 631-639.
- DU X L, HAN Y Q, JIN L, et al. Statistical investigation on effects of aggregate distribution on concrete compression strength and the descending part of stress-strain curve [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(6): 631-639. (in Chinese)
- [26] DU X, JIN L, MA G. A meso-scale numerical method for the simulation of chloride diffusivity in concrete [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 85: 87-100.
- [27] WRIGGERS P, MOFTAH S O. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behaviour [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2006, 42(7): 623-636.
- [28] MAXWELL J C. *A treatise on electricity and magnetism* [M]. New York: Dover Publication, 1954: 50-78.
- [29] International Organization for Standardization. *Fire resistance test on elements of building construction: ISO 834-1* [S]. Geneva: International Standards Organisation, 1999: 12.
- [30] PENG G. Evaluation of fire damage to high performance concrete [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2000: 23-29.

(责任编辑 吕小红)