

文章编号:1007-9629(2023)05-0465-10

# 考虑孔溶液相变的寒区混凝土导热系数计算模型

宫经纬<sup>1,2,\*</sup>, 陈鹏<sup>1,2</sup>, 曹国举<sup>1,2</sup>, 陈瑞<sup>1,2</sup>, 贺传卿<sup>3</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业大学  
新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆乌鲁木齐 830052;  
3.新疆水利水电科学研究院,新疆乌鲁木齐 830049)

**摘要:**将寒区混凝土视为多相复合材料,基于比等效导热相等法则建立了能够动态表征饱和度、温度及孔隙分布对混凝土导热系数影响的计算模型,并且将模型计算值与实测值进行了对比分析.结果表明,计算模型有效刻画了正负温交替条件下混凝土孔溶液的相变特征,客观揭示了寒区温度变化过程中混凝土导热系数的演化机理.

**关键词:**混凝土导热系数;比等效导热相等法则;温变;饱和度;孔隙分布

中图分类号:TV41

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.05.003

## Calculation Model of Thermal Conductivity of Concrete in Cold Regions Considering Pore-Solution Phase Transformation

GONG Jingwei<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Peng<sup>1,2</sup>, CAO Guojun<sup>1,2</sup>, CHEN Rui<sup>1,2</sup>, HE Chuanqing<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

**Abstract:** The concrete in cold regions was considered as a multiphase composite material, and a calculation model that can dynamically characterize the effects of saturation, temperature and pore distribution on the thermal conductivity of concrete was established based on the law of equivalent thermal conductivity. The calculated values of the model and the measured values were compared and analyzed. The results show that the calculation model effectively portrays the phase change characteristics of the pore solution in concrete under the conditions of alternating positive and negative temperatures, and objectively reveals the evolution mechanism of the thermal conductivity of concrete in the process of temperature change in cold regions.

**Key words:** thermal conductivity of concrete; equal law of specific equivalent heat conduction; temperature change; saturation; pore distribution

导热系数是衡量混凝土热传导性能的重要指标.混凝土是具有微观孔隙结构的多相复合材料.在温变和含水条件下,寒区混凝土的导热系数会因其孔溶液的相变而发生变化<sup>[1]</sup>.因此,深入研究寒区混凝土导热系数在温变条件下的变化规律并建立计算模型,是准确评价寒区混凝土热学状态所要开展的

基础性研究工作<sup>[2]</sup>.

国内外学者建立的混凝土导热系数计算模型<sup>[3-12]</sup>多是基于有效介质理论,将混凝土视为连续相与分散相组成的复合材料,根据分散相的排列方式、形状和体积等特征,建立了 Maxwell-Eucken 模型<sup>[7]</sup>、Campbell-Allen 模型<sup>[9]</sup>、Bruggeman 模型<sup>[10]</sup>和

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51869031,51641906,51541909);新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学基金青年项目(XJEDU2020Y020);天山青年计划项目(2020Q017)

第一作者(通讯作者):宫经纬(1984—),男,湖北随州人,新疆农业大学教授,博士生导师,博士. E-mail: gongjingwei@xjau.edu.cn

Hasselman-Johnson模型<sup>[11]</sup>等计算模型.近年来,有学者在此基础上进一步考虑界面(ITZ)等显微结构,建立了混凝土导热系数计算模型<sup>[12]</sup>.

以上模型侧重于研究常温下分散相(骨料)的几何因子(如形状、大小、排列方式等)对混凝土导热系数的影响,没有考虑环境温度、饱和度和孔隙分布等因素.因此,模型难以定量描述正负温交替时不同饱和度条件下混凝土孔隙内冰晶体体积动态变化<sup>[13]</sup>过程对混凝土导热系数的影响.

为此,本文充分考虑混凝土孔溶液在温变作用下的相变过程,将混凝土视为三相复合材料,基于比等效导热相等法则,通过对混凝土最小三相单元体进行微分推导,探究温度、饱和度对混凝土导热系数

(λ)的影响机制,以期建立能够动态表征温度、饱和度和孔隙分布对混凝土导热系数影响的计算模型,为寒区混凝土结构的温度裂缝控制提供理论依据.

### 1 基于比等效导热相等法则的导热系数计算模型

假定混凝土内部骨料及孔隙均匀分布,在细观层次上由等效固相、孔隙冰-水相和孔隙气相3部分组成.其中:等效固相由水泥石、细骨料和粗骨料组成;孔隙冰-水相由水、冰或冰水混合物构成;孔隙气相为空气.孔隙冰-水相有3种状态:当温度为正温时,孔隙冰-水相为水;当温度为负温时,孔隙冰-水相为冰或冰水混合物.图1为导热系数计算模型示意图.

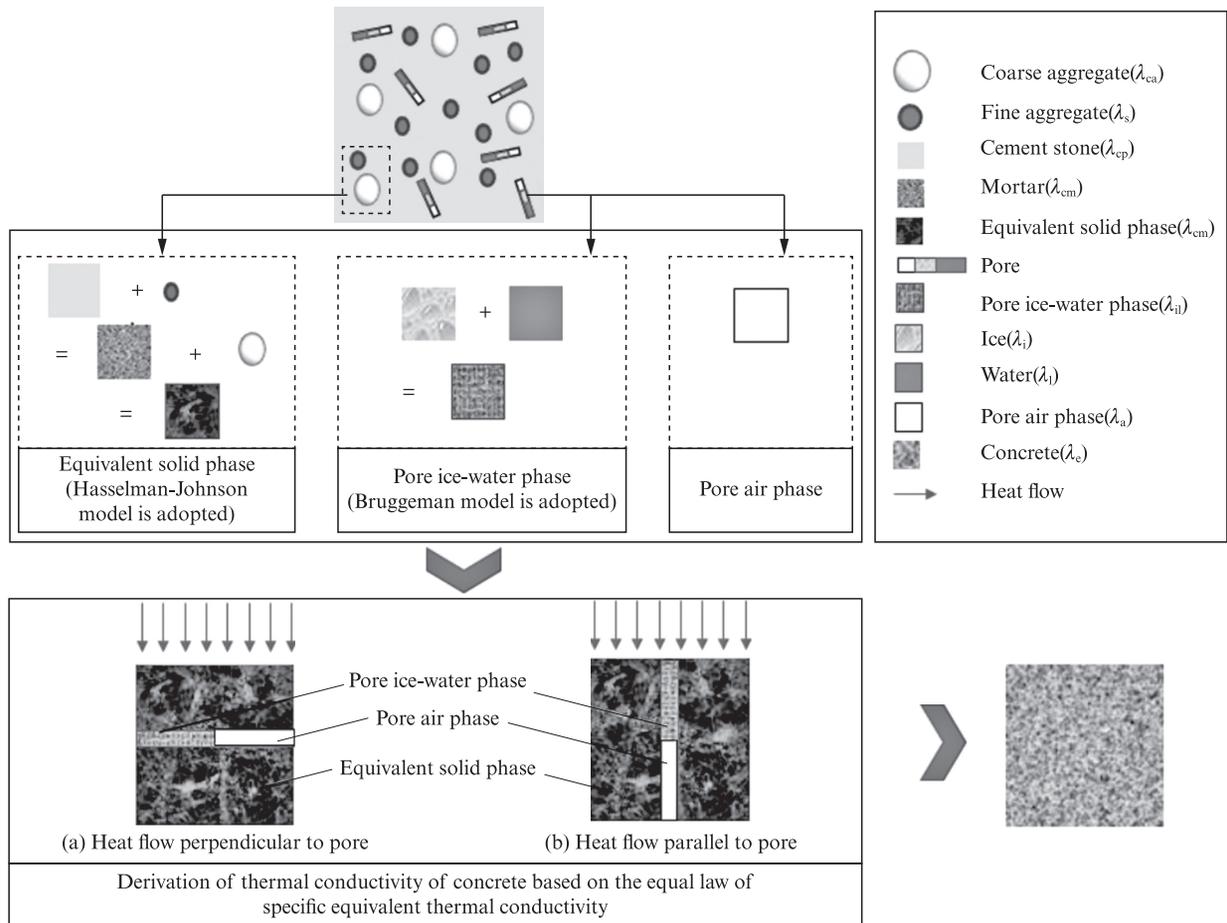


图1 导热系数计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal conductivity calculation model

#### 1.1 等效固相导热系数计算

基于Hasselman-Johnson模型,分别计算砂浆和等效固相的等效导热系数,如式(1)、(2)所示<sup>[11]</sup>.

$$\lambda_{cm} = \lambda_{cp} \frac{2\lambda_{cp} + \lambda_s(1 + 2\alpha_2) - 2[\lambda_{cp} - \lambda_s(1 - \alpha_2)]v_{fa}}{2\lambda_{cp} + \lambda_s(1 + 2\alpha_2) + [\lambda_{cp} - \lambda_s(1 - \alpha_2)]v_{fa}} \quad (1)$$

$\lambda_c =$

$$\lambda_{cm} \frac{2\lambda_{cm} + \lambda_{ca}(1 + 2\alpha_1) - 2[\lambda_{cm} - \lambda_{ca}(1 - \alpha_1)]v_{ca}}{2\lambda_{cm} + \lambda_{ca}(1 + 2\alpha_1) + [\lambda_{cm} - \lambda_{ca}(1 - \alpha_1)]v_{ca}} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{cm}$ 为砂浆的导热系数, W/(m·K); $\lambda_{cp}$ 为水泥石(完全密实)的导热系数,取 $\lambda_{cp} = 1.237 - 0.002T$ (T为

温度),  $W/(m \cdot K)^{[14]}$ ;  $\lambda_s$  为细骨料的导热系数, 取  $\lambda_s = 4.248 - 0.024T, W/(m \cdot K)^{[14]}$ ;  $v_{fs}$  为细骨料在砂浆中的体积分数;  $\lambda_c$  为等效固相的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_{cs}$  为粗骨料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $v_{cs}$  为粗骨料在混凝土中的体积分数;  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为粗骨料与砂浆间的界面热阻系数和细骨料与水泥石间的界面热阻系数, 取  $\alpha_1 = -0.024Sr + 0.204, \alpha_2 = -0.014Sr + 0.182^{[14]}$  ( $Sr$  为试样的饱和度).

### 1.2 孔隙冰-水相导热系数计算

采用压汞法对混凝土的孔隙分布进行测试, 用三次指数衰减式<sup>[15]</sup>表示累计进汞体积 ( $V_r$ ) 与混凝土孔隙半径 ( $r$ ) 的关系, 即:

$$V_r = A_1 e^{-\frac{r}{t_1}} + A_2 e^{-\frac{r}{t_2}} + A_3 e^{-\frac{r}{t_3}} + v_0 \quad (3)$$

式中:  $A_1, A_2, A_3, t_1, t_2, t_3, v_0$  均为拟合参数.

累计进汞体积与混凝土孔隙半径的关系如图2所示. 其中:  $V_1$  为最大的压入汞累计体积, 可代表混凝土的总孔隙体积, mL;  $r_{min}$  为临界最小结冰孔径,  $\mu m$ ;  $V_2$  为对应的孔径大于  $r_{min}$  的孔隙体积之和, mL.

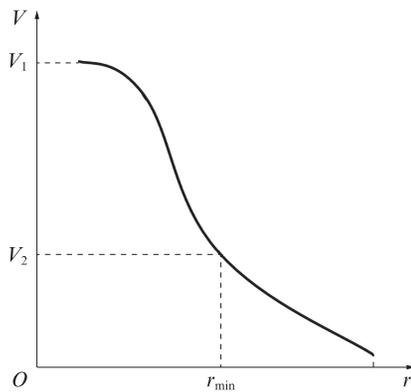


图2 累计进汞体积与混凝土孔隙半径的关系

Fig. 2 Relationship between cumulative mercury inflow volume and pore radius of concrete

孔隙冰-水相导热系数的计算步骤如下:

(1) 孔隙水在降温结冰过程中水的过冷度 ( $\Delta T$ ) 与孔尺寸的关系如式(4)所示<sup>[16]</sup>.

$$r = \frac{-64.67}{\Delta T} - 0.23 + \delta = \frac{-64.67}{\Delta T} + 0.57 \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为孔壁的非结冰层水的厚度, 与温度相关, 一般取  $0.8 \text{ nm}^{[17]}$ .

(2) 将  $T$  代入式(4), 得到该温度下孔隙水结冰的  $r_{min}$ , 即在温度为  $T$  时, 孔径大于  $r_{min}$  孔隙的累计体积为  $V_2$ , 其内的水处于结冰状态 (见图2); 反之, 则处于未结冰状态.

(3) 温变前试样的饱和度为  $Sr$ , 故初始孔隙水含量 ( $V_3$ ) 为:

$$V_3 = V_1 \times Sr \quad (5)$$

(4) 温变后, 孔隙水结冰体积 ( $V_i$ ) 为:

$$V_i = V_2 \times Sr \times 1.09 \quad (6)$$

对应未冻水的体积 ( $V_1$ ) 为:

$$V_1 = V_3 - V_i \quad (7)$$

(5) 随着温度的降低, 孔隙内冰晶体的体积分数逐步上升, Bruggeman 模型适用于分散相 (冰晶体) 含量高的孔隙冰-水相导热系数的计算, 能够在计算过程中充分考虑冰晶间的相互作用对导热系数的影响, 如式(8)所示.

$$(1 - v_i)^3 = \frac{\lambda_i (\lambda_{ii} - \lambda_i)}{\lambda_{ii} (\lambda_i - \lambda_i)}^3 \quad (8)$$

式中:  $\lambda_{ii}$  为孔隙冰-水相的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_i$  为水的导热系数, 取  $\lambda_i = 0.562 + 0.012T, W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_i$  为冰的导热系数, 取  $\lambda_i = 2.206 - 0.012T, W/(m \cdot K)$ ;  $v_i = V_i / (V_i + V_1)$ , 为冰的相对体积分数.

### 1.3 基于比等效导热相等法则的混凝土导热系数模型推导

根据比等效导热相等法则<sup>[18-19]</sup>可知, 在仅考虑热传导的前提下, 当复合材料的单元体与总体有相等的比等效热阻时, 该单元体与总体具有相同的导热性能. 采用比等效导热相等法则理论进行寒区混凝土导热系数的研究, 即归结为研究包含等效固相、孔隙冰-水相和孔隙气相的最小三相单元体的导热系数. 该理论可以从更微观的角度考虑孔隙分布、饱和度和环境温度等因素对混凝土导热系数的影响.

图3为热流平行于孔隙时的推导简图. 本文将混凝土内部孔隙假定为圆柱体. 因此, 基于比等效导热相等法则, 将混凝土材料视为如图3(a)所示的内部含有圆柱体 (直径为  $2a$ 、高为  $2b$ ) 的正方体 (边长为  $2b$ ) 单元体组成的密堆体. 考虑到热流传递方向, 分别按热流平行于孔隙和热流垂直于孔隙2种传递方向进行分析.

#### 1.3.1 热流方向平行于孔隙结构时的导热系数模型推导

如图3(b)所示, 假设原点位于正方体中心, 正方体单元体被垂直于  $x$  轴的平面截成薄片, 其厚度为  $dx$ , 长宽均为  $2b$ , 中部孔隙半径为  $a$ , 如图3(c)所示. 第1象限部分由垂直于  $z$  轴且相距为  $dz$  的2个平面继续分割, 得到如图3(d)所示长为  $b$ , 宽为  $dx$ , 高为  $dz$  的计算微元.

计算微元中孔隙冰-水相/孔隙气相、等效固相所占的体积比分别为  $y/b$  和  $(b-y)/b$ , 由于热流的方向垂直于  $zoy$  面, 孔隙冰-水相/孔隙气相、等效

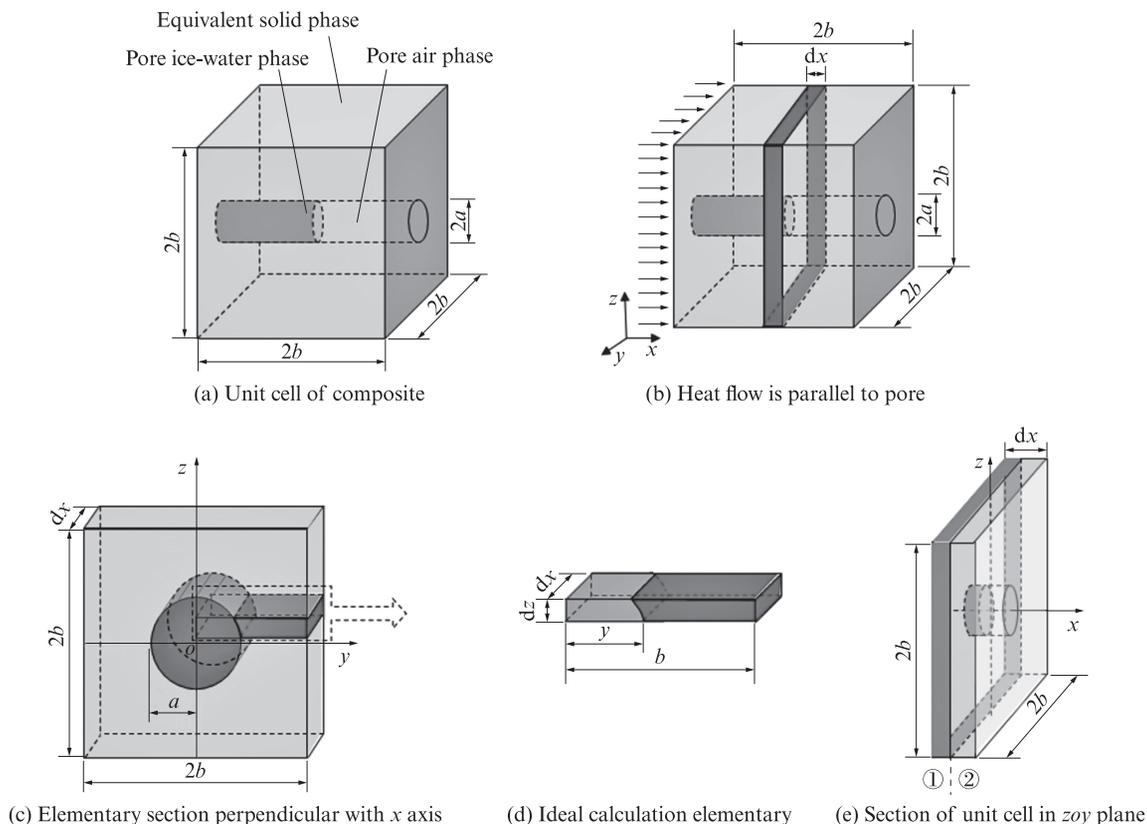


图3 热流平行于孔隙时的推导简图

Fig. 3 Derivation diagram of heat flow parallel to pores

固相的热阻为并联关系,基于热阻定义和热阻并联时的性质,可以得到计算微元的导热系数( $\lambda_{SQ}$ ),即:

$$\lambda_{SQ} = \frac{\lambda_F y}{b} + \frac{\lambda_G (b-y)}{b} = \frac{(\lambda_F - \lambda_G)y}{b} + \lambda_G \quad (9)$$

式中: $\lambda_F$ 为分散相(孔隙冰-水相/孔隙气相)的导热系数, $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_G$ 为连续相(等效固相)的导热系数,其满足关系式 $\lambda_G = \lambda_c, W/(m \cdot K)$ ;  $y = \sqrt{a^2 - z^2}$ .

图3(c)中的薄片微元体是关于 $y$ 轴、 $z$ 轴均对称的图形,由比等效导热相等法则可知,第1象限薄片微元体的导热系数即为整个薄片的导热系数( $\lambda_{BP}$ ),即:

$$\lambda_{BP} = \left( \sum \lambda_{SQ} b dx dz \right) / (b^2 dx) \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得:

$$\lambda_{BP} = \int_0^b (\lambda_F - \lambda_G) \frac{y}{b^2} dz + \int_0^b \frac{\lambda_G}{b} dz = \frac{\pi(\lambda_F - \lambda_G)}{4} \left( \frac{a}{b} \right)^2 + \lambda_G \quad (11)$$

按饱和度将图3(c)中的薄片微元体分为①、②2个区域,如图3(e)所示.①、②区域分别代表孔隙冰-水相与等效固相的复合体、孔隙气相与等效固相的复合体.

由于混凝土孔隙率 $n = \pi a^2 / 4b^2$ ,则 $a^2 / b^2 = 4n / \pi$ ,将其代入式(11)得:

$$\lambda_{BP} = (\lambda_F - \lambda_G)n + \lambda_G \quad (12)$$

对于①区域,有 $\lambda_G = \lambda_c, \lambda_F = \lambda_{i1}$ ,式(12)则为①区域的导热系数( $\lambda_{①}$ ):

$$\lambda_{①} = (\lambda_{i1} - \lambda_c)n + \lambda_c \quad (13)$$

对于②区域,有 $\lambda_G = \lambda_c, \lambda_F = \lambda_a$ ,式(12)则为②区域的导热系数( $\lambda_{②}$ ):

$$\lambda_{②} = (\lambda_a - \lambda_c)n + \lambda_c \quad (14)$$

此时,热流方向平行于 $x$ 轴,①、②区域的热阻在热流传导过程中是串联关系,由热阻的定义及串联热阻的关系,可得单元体的有效导热系数( $\lambda_I$ )为:

$$\lambda_I = \frac{1}{v_{①}/\lambda_{①} + v_{②}/\lambda_{②}} \quad (15)$$

式中: $v_{①}$ 、 $v_{②}$ 为①、②区域占2个区域的百分比.

由饱和度的定义可知:

$$v_{①} = Sr \quad (16)$$

$$v_{②} = 1 - Sr \quad (17)$$

将式(12)、(13)、(16)、(17)代入(15)可得:

$$\lambda_I = \left[ \frac{Sr}{[(\lambda_{i1} - \lambda_c)n + \lambda_c]} + \frac{1 - Sr}{[(\lambda_a - \lambda_c)n + \lambda_c]} \right]^{-1} \quad (18)$$

1.3.2 热流方向垂直于孔隙结构时的导热系数模型推导

图4为热流垂直于孔隙时的推导简图.当热流方向垂直于孔隙结构时,正方体单元体分为①、②、③区域,如图4(a)所示.其中:①、③区域均为等效固相,其导热系数为 $\lambda_s$ ;②区域为孔隙冰-水相/孔隙气

相与等效固相的复合体,假设原点位于正方体中心,正方体单元体②区域被垂直于 $x$ 轴的平面截成薄片,其厚度为 $dx$ ,长宽均为 $2b$ ,如图4(b)所示;薄片在 $y$ 轴正向的部分由垂直于 $z$ 轴且相距为 $dz$ 的2个平面继续分割,得到长为 $b$ ,宽为 $dx$ ,高为 $dz$ 的计算微元,如图4(c)所示.

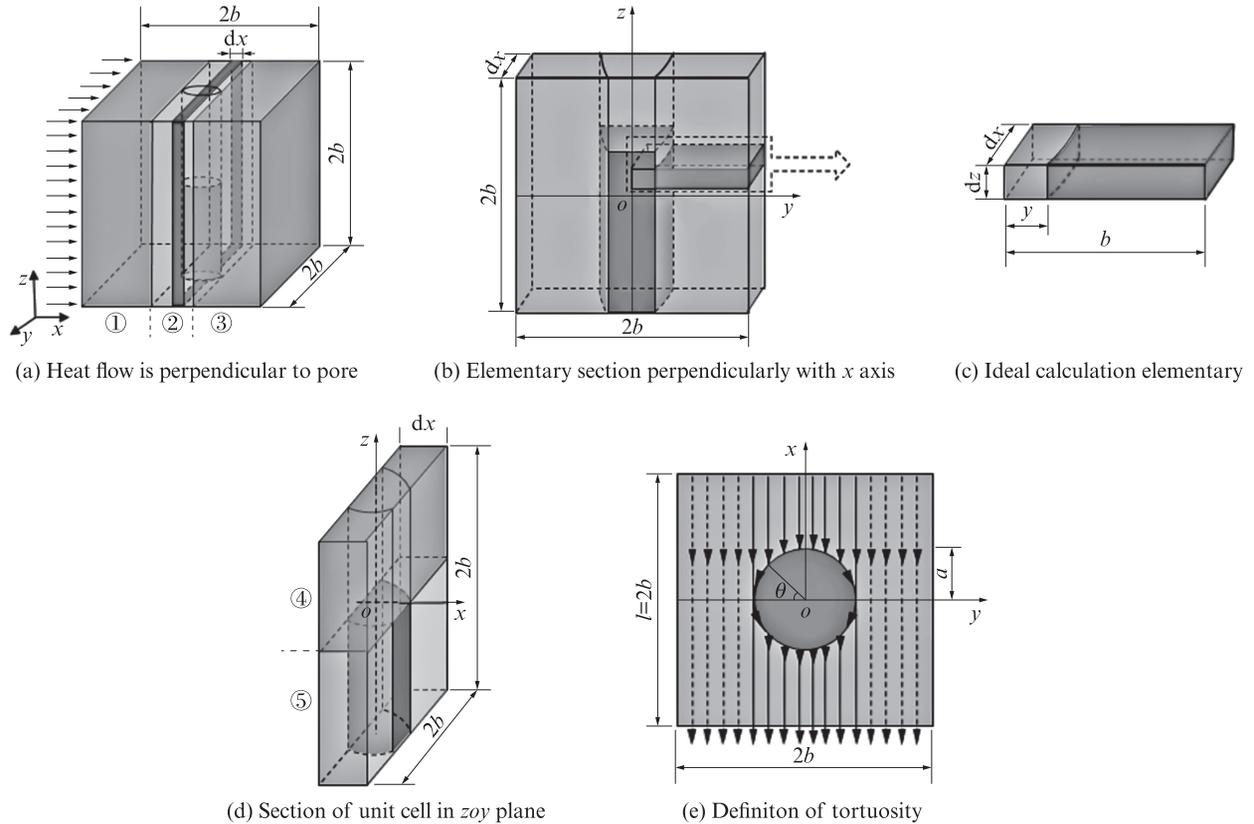


图4 热流垂直于孔隙时的推导简图

Fig. 4 Derivation diagram of heat flow perpendicular to pores

同理,图4(c)的小长方体导热系数如式(9)所示,此时 $y = \sqrt{a^2 - x^2}$ .图4(b)中的薄片微元体是关于 $z$ 轴对称的图形,由比等效导热相等法则可知,第1、4象限薄片微元体的导热系数即为整个薄片的导热系数,即:

$$\lambda_{BP} = \frac{\sum \lambda_{sq} b dx dz}{2b^2 dx} \quad (19)$$

把式(9)代入式(19)得:

$$\lambda_{BP} = \int_0^{2b} \frac{(\lambda_F - \lambda_G) y dz}{2b^2} + \int_0^{2b} \frac{\lambda_G dz}{2b} = (\lambda_F - \lambda_G) \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{b} + \lambda_G \quad (20)$$

按饱和度将②区域的薄片分为④、⑤区域,分别代表孔隙冰-水相与等效固相的复合体、孔隙气相与等效固相的复合体,如图4(d)所示.

对于④区域,有 $\lambda_F = \lambda_a, \lambda_G = \lambda_c$ .取 $\lambda_a = 0.024 +$

$0.001T$ ,式(20)则为:

$$\lambda_{BP④} = (\lambda_a - \lambda_c) \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{b} + \lambda_c \quad (21)$$

对于⑤区域,有 $\lambda_F = \lambda_{ii}, \lambda_G = \lambda_c$ ,式(20)则为:

$$\lambda_{BP⑤} = (\lambda_{ii} - \lambda_c) \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{b} + \lambda_c \quad (22)$$

利用积分平均的方法,对 $\lambda_{BP}$ 在 $x$ 轴方向上积分如图4(a)所示,结合比等效导热相等法则,即可得到图4(a)中②区域的导热系数,即为孔隙冰-水相/孔隙气相与等效固相复合体的导热系数( $\lambda_{FH}$ ):

$$\lambda_{FH} = \frac{\int_0^a ((\lambda_F - \lambda_G) \sqrt{a^2 - x^2} / b + \lambda_G) dx}{\int_0^a dx} = \frac{(\lambda_F - \lambda_G) a \pi}{4b} + \lambda_G \quad (23)$$

此时,由于孔隙冰-水相/孔隙气相与等效固相导

热性能的差异,热流在孔隙相、等效固相的复合部分的传播不再是直线,通过孔隙时会发生明显曲折现象,如图4(e)所示,虚线箭头所示的热流线仅通过等效固相,其传播路径与表观几何厚度( $l$ )一致,实线箭头所示的热流线不仅通过等效固相,还需经过孔隙相,当热流传播至孔隙相时,其传播路径沿孔隙表面曲折,因此实际传播路径( $l_e$ )的长度大于 $l$ ,以图中左侧的一条实际传播路径为例, $\theta$ 为热流线与孔隙表面切线的接触角, $l_e$ 会随 $\theta$ 的改变而改变;由图4(e)易得 $l=2b$ .当热流的传播路径增加时,其热阻将增加,即②区域的导热系数与其迂曲度( $\tau=l_e/l$ )呈反比<sup>[20]</sup>.利用积分平均方法,对 $l_e$ 在 $(0,\pi/2)$ 范围内进行积分即可得到等效的热流实际传播路径,进而得到等效的迂曲度:

$$l_e = 2 \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( b - a \sin \theta + \frac{\theta \pi}{2} 2\pi a \right) d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta} = \frac{2b + \left( \frac{\pi^2}{8} - 1 \right) a}{\pi} \quad (24)$$

$$\tau = \frac{l_e}{l} = \frac{2b + \left( \frac{\pi^2}{8} - 1 \right) a}{\frac{\pi}{2b}} = 1 + \frac{\left( \frac{\pi^2}{4} - 2 \right) a}{\pi b} \quad (25)$$

$$\lambda_{FH} = \left[ \frac{(\lambda_F - \lambda_G) a \pi}{4b} + \lambda_G \right] / \tau \quad (26)$$

对于同时属于②区域和④区域,有 $\lambda_F = \lambda_a, \lambda_G = \lambda_c$ ,式(26)则为:

$$\lambda_{FH②④} = \left[ \frac{(\lambda_a - \lambda_c) a \pi}{4b} + \lambda_c \right] / \tau \quad (27)$$

对于同时属于②区域和⑤区域,有 $\lambda_F = \lambda_{ii}, \lambda_G = \lambda_c$ ,式(26)则为:

$$\lambda_{FH②⑤} = \left[ \frac{(\lambda_{ii} - \lambda_c) a \pi}{4b} + \lambda_c \right] / \tau \quad (28)$$

式中: $a/b = 2\sqrt{n/\pi}$ .

由于②、④区域的复合体与①、③区域的等效固相在热流方向上是串联的,基于热阻的定义及串联热阻的计算公式推得①、②、③、④区域复合体的有效导热系数( $\lambda_{⑥}$ ),即:

$$\lambda_{⑥} = \frac{1}{\frac{a}{b\lambda_{FH②④}} + \frac{1 - \frac{a}{b}}{\lambda_G}} = \frac{1}{\frac{\tau}{\left[ \frac{\pi}{4} (\lambda_a - \lambda_c) + \frac{\lambda_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \right]} + \frac{1 - 2\sqrt{\frac{n}{\pi}}}{\lambda_c}} \quad (29)$$

同理可求得①、②、③、⑤区域复合体的有效导热系数( $\lambda_{⑦}$ ),即:

$$\lambda_{⑦} = \frac{1}{\frac{a}{b\lambda_{FH②⑤}} + \frac{1 - \frac{a}{b}}{\lambda_G}} = \frac{1}{\frac{\tau}{\left[ \frac{\pi}{4} (\lambda_{ii} - \lambda_c) + \frac{\lambda_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \right]} + \frac{1 - 2\sqrt{\frac{n}{\pi}}}{\lambda_c}} \quad (30)$$

由于⑥、⑦2区域在热流方向上是并联的,由热阻的定义及并联热阻的性质推得单元体的有效导热系数( $\lambda_{II}$ ),即:

$$\lambda_{II} = (1 - Sr)\lambda_{⑥} + Sr\lambda_{⑦} = \frac{(1 - Sr)}{\left[ \tau \left( \frac{\pi(\lambda_a - \lambda_c)}{4} + \frac{\lambda_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \right)^{-1} + \left( 1 - 2\sqrt{\frac{n}{\pi}} \right) \lambda_c^{-1} \right]} + \frac{Sr}{\left[ \tau \left( \frac{\pi(\lambda_{ii} - \lambda_c)}{4} + \frac{\lambda_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \right)^{-1} + \left( 1 - 2\sqrt{\frac{n}{\pi}} \right) \lambda_c^{-1} \right]} \quad (31)$$

假定混凝土内部孔隙分布均匀,则热流方向平行于孔隙结构和热流方向垂直孔隙结构具有相同的发生概率,则有混凝土导热系数( $\lambda_c$ ):

$$\lambda_c = \frac{1}{2} \lambda_I + \frac{1}{2} \lambda_{II} \quad (32)$$

将式(18)、(31)代入式(32)即得混凝土三相导热系数计算模型:

$$\lambda_e = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{SrA_I + (1 - Sr)B_I} + \frac{Sr}{\tau A_{II} + C} + \frac{1 - Sr}{\tau B_{II} + C} \right) \quad (33)$$

式中: $A_I$ 为热流平行孔隙时,等效固相、孔隙冰-水相双相影响因子  $A_I(\lambda_{ii}, \lambda_c, n) = 1/[(\lambda_{ii} - \lambda_c)n + \lambda_c]$ , (m·K)/W; $B_I$ 为热流平行孔隙时,等效固相、孔隙气相双相影响因子,  $B_I(\lambda_a, \lambda_c, n) = 1/[(\lambda_a - \lambda_c)n + \lambda_c]$ , (m·K)/W; $A_{II}$ 为热流垂直孔隙时,等效固相、孔隙冰-水相双相影响因子,  $A_{II}(\lambda_{ii}, \lambda_c, n) = 1/\left[\frac{\pi}{4}(\lambda_{ii} - \lambda_c) + \frac{\lambda_c}{2}\sqrt{\frac{\pi}{n}}\right]$ , (m·K)/W; $B_{II}$ 为热流垂直孔隙时,等

效固相、孔隙气相双相影响因子,  $B_{II}(\lambda_a, \lambda_c, n) = 1/\left[\frac{\pi}{4}(\lambda_a - \lambda_c) + \frac{\lambda_c}{2}\sqrt{\frac{\pi}{n}}\right]$ , (m·K)/W; $C$ 为等效固相单相影响因子,  $C(\lambda_c, n) = \left(1 - 2\sqrt{\frac{n}{\pi}}\right)/\lambda_c$ , (m·K)/W.

## 2 混凝土导热系数试验及模型验证

### 2.1 原材料及试件配合比

水泥采用新疆某水泥厂P·I 42.5水泥;细骨料为乌鲁木齐料场中砂,细度模数2.7;粗骨料为乌鲁木齐料场5~20 mm碎石;减水剂采用新疆格辉外加剂公司生产的高性能减水剂.采用上述原材料成型混凝土试件,基本参数如表1所示.

表1 混凝土试件的参数

Table 1 Parameters of concrete specimen

$m_w/m_c$	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )				$\varphi$ (cement stone)/%	$\varphi$ (fine aggregate)/%	$\varphi$ (coarse aggregate)/%	Porosity(by volume)/%
	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate				
0.4	210	526	563	1 045	34.36	21.00	39.00	5.64

### 2.2 试验仪器及试验过程

考虑到本试验是在变温环境下测试混凝土的导热系数,采用瞬态测试法,选用QTM-500型快速导热仪,可以在99 s内完成测试,测试温度区间为-100~1 000 °C,测试范围为0.02~12.00 W/(m·K);环境温度通过高低温试验箱控制,变化区间为-30~20 °C;孔隙参数采用PoreMaster-60型全自动压汞仪进行测试.

根据SL-352—2017《水工混凝土试验规程》制作尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的试件,3 d后拆模,并将试件置于20 °C、湿度大于95%的标准养护室中养护28 d;随后,将养护好的试件切割、打磨为150 mm×150 mm×30 mm的板状试件备用.

Sr设定为0%、25%、50%、75%和100%,其定义式为:

$$Sr = \frac{m_i - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (34)$$

式中: $m_i$ 为对应饱和度下的混凝土试件质量,g; $m_1$ 为完全干燥下的混凝土试件质量,g; $m_2$ 为完全饱和下的混凝土试件质量,g.

通过控制试件质量来调控试件的饱和度,其过程如下:首先,试件在105 °C条件下烘干直至质量恒定,此时质量计为 $m_1$ ;然后,将试件置于真空保水机

中完全饱和,此时质量计为 $m_2$ ;最后,通过60 °C将试件烘干至对应饱和度下的质量 $m_i$ ,以达到控制饱和度的目的.

本试验需要连续测试20、10、0、-10、-20、-30 °C下的导热系数.由于高低温试验箱在调节温度、恒温过程中耗时较长,在此过程中,使试件保持设定饱和度是保证试验结果准确性需要考虑的问题.为此,在试件表面包裹保鲜膜,外层采用硅胶进一步密封,使试件在测试过程中能保持设定的饱和度.图5为试件密封示意图.

导热系数测试过程如下:

(1)将QTM-500快速导热仪进行矫正.

(2)将制备好的不同饱和度混凝土试件置于高低温试验箱,依次设定20、10、0、-10、-20、-30 °C,在每个温度条件下恒定4 h,分别测试对应温度下的导热系数.

为了减少试验测量误差,每个饱和度对应的试件制备3个,同一饱和度和同一温度条件下混凝土导热系数的有效测试值取3个测试结果的平均值.

### 2.3 结果及分析

图6为实测导热系数( $\lambda_{exp}$ )与温度、饱和度的关系.由图6可见:随着饱和度的增大和温度的降低,混凝土的导热系数随之增大;在0~20 °C的正温度区间

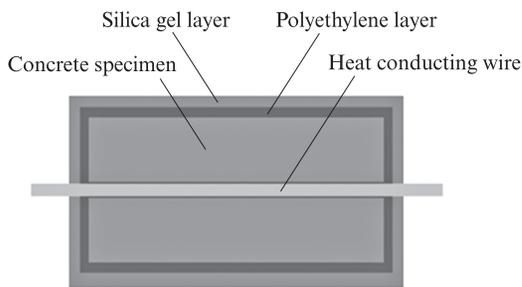


图5 试件密封示意图

Fig. 5 Schematic diagram of specimen sealing

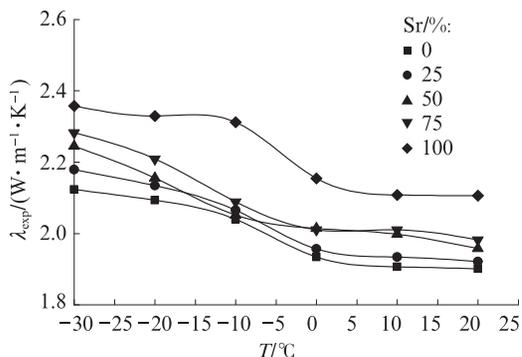
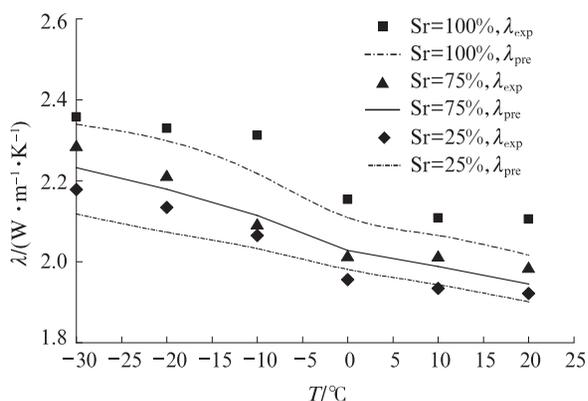


图6 实测导热系数与温度、饱和度的关系

Fig. 6 Relation of experimental thermal conductivity with temperature and saturation

内,导热系数的增幅较为平缓,各饱和度混凝土在该温度区间内的导热系数增幅为0.11%~2.19%;在-10~0 °C的温度区域内,由于混凝土孔溶液转变为冰,而冰的导热系数约为水的4倍,导致混凝土的导热系数增幅明显变大,为1.86%~7.34%;随着饱和度的增大,其对混凝土导热系数在-10~0 °C的变幅影响也更加显著。

图7为压入汞累计体积与孔隙半径的关系。



(a) Sr=25%, 70%, 100%

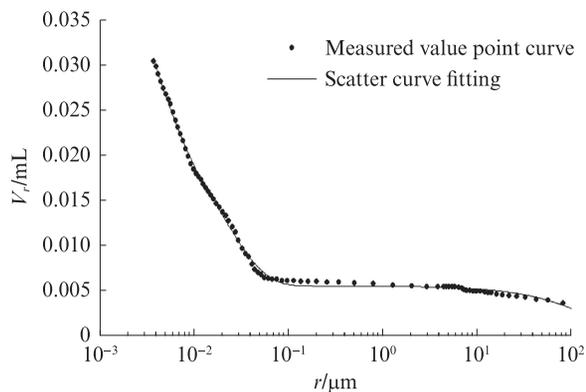


图7 压入汞累计体积和孔隙半径关系

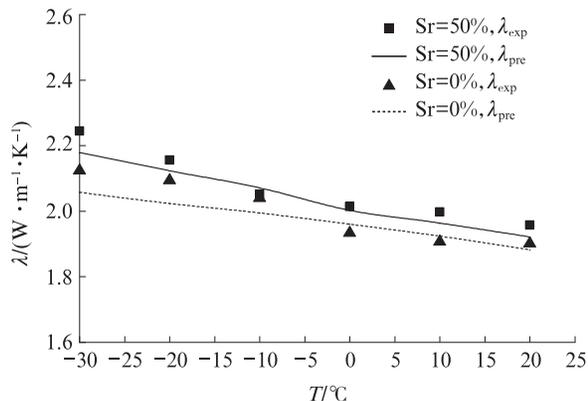
Fig. 7 Relation of cumulative volume of injected mercury with pore radius

采用式(3)所示的3次指数衰减式对试验数据进行拟合,得孔隙半径与压入汞累计体积的关系:

$$V_r = 0.03273e^{-\frac{r}{0.00273}} + 0.02014e^{-\frac{r}{0.02104}} + 0.00522e^{-\frac{r}{155.61934}} + 2.63522 \times 10^{-4} \quad (35)$$

2.4 模型验证

基于上述测试数据,采用本文建立的混凝土导热系数计算模型,对不同温度、饱和度等试验条件下的混凝土导热系数进行计算,并与实测导热系数进行了比较.图8为混凝土导热系数实测值与模型计算值( $\lambda_{pre}$ ).由图8可知,混凝土导热系数计算模型计算值随饱和度、温度的变化规律与实测值具有较好的一致性,计算值与实测值的相对误差为-4.32%~1.39%,误差较小.表明基于等效导热相等法则所建立的寒区混凝土导热系数模型,能够对不同温度和不同饱和度条件下的混凝土导热系数进行预测,计算精度较高。



(b) Sr=0%, 50%

图8 混凝土导热系数实测值与模型计算值

Fig. 8 Experimental and model predicted values of thermal conductivity of concrete

由图1可知, $\lambda_c$ 是由 $\lambda_c$ 、 $\lambda_{il}$ 以及 $\lambda_a$ 共同决定.由式(30)可知,在0~-10 °C的温度范围内,由于混凝土

孔溶液结冰, $\lambda_{il}$ 发生大幅增加,此时 $\lambda_c$ 也发生了大幅增加.以饱和度为100%的试样为例,在-10~0 °C的

温度范围内,  $\lambda_c$  的增幅为 1.97%,  $\lambda_a$  的增幅为 -3.38%, 但  $\lambda_i$  的增幅为 198.74%, 导致  $\lambda_{\text{总}}$  的增幅为 5.55%, 而在此过程中  $\lambda_c$  的增幅为 5.21%, 与  $\lambda_{\text{总}}$  的增幅相当. 由此可知, 混凝土导热系数在 -10~0 °C 内的突变, 本质是由  $\lambda_i$  所主导.

上述分析表明, 本文基于比等效导热相等法则建立的寒区混凝土导热系数计算模型能够动态表征温变作用下孔隙内溶液的相变特征, 并揭示出在不同温度、不同饱和度条件下导热系数的变化机理.

现有学者对混凝土导热系数的试验及建模方面的研究多是在常温(20 °C)条件下进行的, 为进一步对比验证本文提出的模型的计算精度, 采用文献[8]中的 Maxwell 推广模型对本文温度为 20 °C, 饱和度分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 试验条件下的混凝土导热系数进行计算, 并将文献[8]模型计算值、本文模型计算值与本文试验实测值进行对比, 如图 9 所示. 由图 9 可知, 本文计算模型得到的不同饱和度条件下的导热系数计算值均比文献[8]模型的计算值接近实测值. 同时, 本文模型考虑了更广泛的温度区间, 从更深层次研究了孔隙结构、饱和度对混凝土导热系数的影响机理, 具有更广泛的普适性.

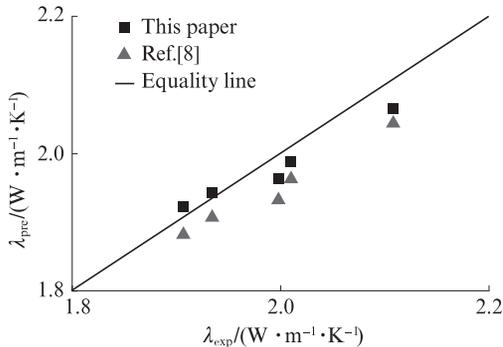


图9 本文模型与文献[8]模型计算值的比较  
Fig. 9 Comparison of predicted values between author's model and reference [8]'s model

### 3 结论

(1) 本模型充分考虑混凝土内部的孔隙分布以及孔溶液在正负温交替时的相变过程, 将寒区混凝土视为多相复合材料, 基于比等效导热相等法则推导并建立了寒区混凝土导热系数计算模型. 同时, 本模型还考虑了热流传递方向的影响, 模型计算值与实测值具有较好的一致性, 计算精度较高.

(2) 本模型的计算结果相比经典 Maxwell 推广模型的计算结果更接近实测值. 同时, 本文模型考虑了更广泛的温度区间, 从更深层次研究了孔隙结构、饱

和度对混凝土导热系数中的影响机理, 具有更广泛的普适性.

(3) 计算模型真实地描述了不同温度和饱和度条件下混凝土导热系数的变化规律, 有效地刻画了混凝土在正负温交替条件下孔溶液的相变特征, 客观地揭示了寒区温度变化过程中混凝土导热系数的演化机理.

### 参考文献:

- [1] 曹国举, 宫经伟, 马利, 等. 不同温度条件下混凝土导热系数影响因素研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12):144-150. CAO Guoju, GONG Jingwei, MA Li, et al. Influence factors of thermal conductivity of concrete under different temperature conditions [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(12):144-150. (in Chinese)
- [2] 陈瑞. 周期性温变作用下孔隙冰晶生长过程及其诱导水泥基材料导热系数演化[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020. CHEN Rui. The process of pore ice crystal growth under the action of periodic temperature change and its induced thermal conductivity evolution of cement-based materials[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [3] 杨正宏, 李婷婷, 于龙. 低密度泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):322-327. YANG Zhenghong, LI Tingting, YU Long. Investigations on thermal conductivity models of low density foamed concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):322-327. (in Chinese)
- [4] 宫经伟, 陈瑞, 曹国举, 等. 基于PPR无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):948-954. GONG Jingwei, CHEN Rui, CAO Guoju, et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):948-954. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] CHOKTAWEEKARN P, SAENGSOY W, TANGTERM-SIRIKUL S. A model for predicting thermal conductivity of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2009, 61(4): 271-280.
- [7] 王星, 王玉璋. 颗粒填充型复合材料有效导热系数的数值计算方法[J]. 材料导报, 2013, 27(20):143-147. WANG Xing, WANG Yuzhang. Numerical calculation method for effective thermal conductivity of particle filled composites[J]. Materials Reports, 2013, 27(20):143-147. (in Chinese)
- [8] 张伟平, 童菲, 邢益善, 等. 混凝土导热系数的试验研究与预测模型[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2):183-189. ZHANG Weiping, TONG Fei, XING Yishan, et al. Experimental study and prediction model of thermal conductivity of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 183-189. (in Chinese)

- [9] CAMPBELL-ALLEN D, THORNE C P. The thermal conductivity of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1963, 43(15):39-48.
- [10] EVERY A G, TZOU G Y, HASSELMAN D, et al. The effect of particle size on the thermal conductivity of ZnS/diamond composites[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1992, 40(1): 123-129.
- [11] HASSELMAN 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.
- [12] 王立成, 常泽, 鲍玖文. 基于多相复合材料的混凝土导热系数预测模型[J]. 水利学报, 2017, 48(7):765-772.  
WANG Licheng, CHANG Ze, BAO Jiuwen. Prediction model for the thermal conductivity of concrete based on its composite structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 765-772. (in Chinese)
- [13] FARNAM Y, TODAK H, SPRAGG R, et al. Electrical response of mortar with different degrees of saturation and deicing salt solutions during freezing and thawing [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 59:49-59.
- [14] 曹国举. 寒区混凝土导热系数影响因素及计算模型研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2018.  
CAO Guoju. Study on influence factors and calculation model for thermal conductivity of concrete in cold region [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] 陈瑞, 宫经伟. 基于细观复合材料的寒区混凝土导热系数模型 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9):142-148.  
CHEN Rui, GONG Jingwei. Predicting theory of effective thermal conductivity of complex material[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(9):142-148. (in Chinese)
- [16] 张楠, 张涛, 廖娟, 等. 利用差示扫描量热法研究孔溶液结冰对水饱和水泥基材料低温热形变的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5):599-603.  
ZHANG Nan, ZHANG Tao, LIAO Juan, et al. Effect of pore solution freezing on thermal strain of water-saturated cement based material at low temperature by differential scanning calorimetry[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5):599-603. (in Chinese)
- [17] YAMAMOTO T, MUKAI S, NITTA K, et al. Evaluation of porous structure of resorcinol-formaldehyde hydrogels by thermoporometry[J]. Thermochimica Acta, 2005, 439(1/2): 74-79.
- [18] 陈春, 钱春香, 许燕波. 颗粒改性复合材料导热系数的等效计算方法[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1):78-82.  
CHEN Chun, QIAN Chunxiang, XU Yanbo. An equivalent calculation method for thermal conductivity of particle modified composites[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(1): 78-82. (in Chinese)
- [19] 庞旭明, 周剑秋, 杨晶歆, 等. 含孔隙及界面热阻的复合材料有效导热系数[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8):1668-1674.  
PANG Xuming, ZHOU Jianqiu, YANG Jingxin, et al. Effective thermal conductivity of composite materials containing pore and interface thermal resistance [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8):1668-1674. (in Chinese)
- [20] 谈云志, 喻波, 胡新江, 等. 非饱和土热导率预估模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1):129-133.  
TAN Yunzhi, YU Bo, HU Xinjiang, et al. Prediction model for thermal conductivity of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1):129-133. (in Chinese)