

聚丙烯纤维混凝土高温传热性能多尺度计算模型

陈 猛, 杨新明, 王瑜婷, 张 通
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 聚丙烯纤维被广泛应用于高性能水泥基材料中以减轻结构的高温损伤,但其高温传热参数的计算与预测仍缺乏有效的模型. 基于复合材料均一化方法,提出了聚丙烯纤维混凝土高温传热性能的精细化多尺度计算模型,充分考虑了聚丙烯纤维高温下的体积变化以及纤维熔化后的松弛效应对混凝土导热系数的影响. 基于试验结果的验证可知,提出的计算模型可以很好地预测聚丙烯纤维混凝土高温下的传热性能. 此外,通过模型参数敏感性分析,发现聚丙烯纤维的传热性能和纤维形状对等效导热系数的影响不大,而纤维掺量是影响等效导热系数的主要因素. 分析结果对于纤维混凝土的传热性能设计有一定的参考价值.

关键词: 纤维混凝土; 传热性能; 高温; 均一化方法; 松弛效应

中图分类号: TU 528.572 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0111-07

Multiscale Calculation Model for High Temperature Heat Transfer Property of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

CHEN Meng, YANG Xin-ming, WANG Yu-ting, ZHANG Tong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Tong, E-mail: zhangtong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Polypropylene fibers are widely used in high-performance cement-based materials to reduce the high-temperature damage of structures. However, the calculation and prediction of thermal transfer parameters for polypropylene fiber reinforced concrete at high temperature still lack an effective model. Based on the homogenization method of composite materials, a refined multiscale calculation model was proposed to estimate the equivalent thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced concrete at high temperature, which fully considered the influence of the volume change of polypropylene fiber at high temperature and the relaxation effect after fiber melting. As verified by experimental results, the proposed calculation model can accurately predict the thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced concrete as a function of temperature. In addition, the thermal transfer properties and shape of polypropylene fiber have little effect on the equivalent thermal conductivity, while the fiber content is the main influence factor through model parameter sensitivity analysis. The analysis results provide a reference for the thermal design of fiber reinforced concrete.

Key words: fiber reinforced concrete; heat transfer properties; high temperature; homogenization method; relaxation effect

导热系数作为衡量水泥基材料传热性能的重要指标,对于设计隔热建筑材料和减小建筑能耗有着十分重要的意义. 试验研究表明,很多因素都会影响水泥基材料的导热系数,例如:水化程度、水灰比、骨料的体积分数、外加剂掺量和温

度等^[1]. 为了定量描述众多因素对于导热系数的影响,文献[2-3]基于不考虑界面热阻的Maxwell模型,建立了非饱和混凝土导热系数的细观模型,可以用于预测不同含水率下混凝土的导热系数. 文献[4-5]结合广义灰度关联法,建立了纤维

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178382); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201023, N2301023); 中国博士后科学基金资助项目(2023M730526); 辽宁省博士科研启动基金资助项目(2023-BS-058).

作者简介: 陈 猛(1981—),男,辽宁开原人,东北大学教授.

混凝土的导热系数预测模型,并分析了纤维种类和纤维掺量等因素对混凝土传热性能的影响.文献[6-7]基于分形理论,在充分考虑水泥基材料多尺度特征的前提下,提出了固体-液体-气体三相耦合的水泥基材料导热系数预测模型,系统地分析了孔隙率、孔隙直径分布和分形结构等因素对导热系数的影响.但是,以上预测模型都没有考虑温度的影响,且模型大多假定各组分的形状为球形而忽略了形状效应的影响.

近些年,多种聚合物纤维(如聚丙烯纤维、聚乙烯纤维和聚乙烯醇纤维)都被证明可以有效减轻超高性能混凝土在高温下的爆裂性剥落^[8-9].这是因为聚合物纤维在高温下的体积膨胀和熔化增加了混凝土基体的渗透性^[10].但是,关于聚合物纤维混凝土的传热性能研究仍然较少,且聚合物纤维在高温下的相变对水泥基材料传热性能的影响也缺乏相关定量化计算方法.因此,本文从混凝土的微细观构成出发,基于等效介质化方法,建立了针对聚丙烯纤维混凝土等效导热系数的精细化多尺度计算模型;并结合相关试验数据,验证了提出的多尺度模型预测结果的可靠性;通过参数分析,阐述了纤维形状和掺量等因素对聚丙烯纤维混凝土高温下导热系数的影响.

1 模型建立

1.1 考虑形状特征的导热系数计算模型

基于平均场理论,通过引入局部梯度变量来连接夹杂相(或基体)的平均场以及相应的宏观场,进而描述复合材料的宏观热学和力学性能.具体而言,基于等效介质理论,对含基体材料和夹杂相的复合材料,其等效导热系数可以表示为^[11]

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_m} = [I + RA_i k_m^{-1} (k_i - k_m) R^T \varphi_i] [I + (RA_i R^T - I) \varphi_i]^{-1} \quad (1)$$

其中: k_{eff} 为复合材料整体的等效导热系数张量; k_m 为基体材料的导热系数张量; k_i 为夹杂相的导热系数张量,下标*i*表示夹杂相的类型; I 为单位张量; R 为将局部坐标系转换成全局坐标系的旋转张量; φ_i 为夹杂相的体积分数; A_i 为导热系数的梯度浓度张量,可以表示为

$$A_i = [I + S k_m^{-1} (k_i - k_m)]^{-1} \quad (2)$$

其中, S 为夹杂相的 Eshelby 张量.为了简化计算,

最基本的仅包含基体和 1 种夹杂相的两相复合材料的等效导热系数可以表达为如下的标量形式:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_m} = \frac{1 + F_a \varphi_i}{1 - F_b \varphi_i} \quad (3)$$

其中: k_{eff} 为复合材料整体的等效导热系数; k_m 为基体的导热系数, $\text{K}/(\text{m}\cdot\text{W})$; F_a 和 F_b 为连接基体和夹杂相导热系数的局部梯度变量,分别与夹杂相的形状特征和传热特征紧密相关,可以表示为^[12]

$$F_a = \frac{2}{3} \frac{1 - S_{11}}{(k_i/k_m - 1)^{-1} + S_{11}} + \frac{1}{3} \frac{1 - S_{33}}{(k_i/k_m - 1)^{-1} + S_{33}}, \quad (4)$$

$$F_b = \frac{2}{3} \frac{S_{11}}{(k_i/k_m - 1)^{-1} + S_{11}} + \frac{1}{3} \frac{S_{33}}{(k_i/k_m - 1)^{-1} + S_{33}}. \quad (5)$$

其中: k_i 为夹杂相的导热系数, $\text{K}/(\text{m}\cdot\text{W})$; S_{ii} ($i = 1, 2, 3$)为夹杂相的 Eshelby 分量.如假定夹杂相为椭球形,且其长径比为 δ ,则 S_{ii} 由如下的标量形式^[11]表示:

$$S_{11} = S_{22} = \begin{cases} \frac{\delta^2}{2(\delta^2 - 1)} \left(1 + \frac{\cosh^{-1} \delta}{2\delta \sqrt{\delta^2 - 1}} \right), & \delta < 1; \\ \frac{\delta^2}{2(\delta^2 - 1)} \left(1 - \frac{\cosh^{-1} \delta}{2\delta \sqrt{\delta^2 - 1}} \right), & \delta > 1; \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{33} = 1 - S_{11} - S_{22}. \quad (7)$$

特别地,若假定夹杂相为球体,则式(3)可进一步简化为

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_m} = \frac{k_i/k_m + 2 + 2(k_i/k_m - 1)\varphi_i}{k_i/k_m + 2 - (k_i/k_m - 1)\varphi_i}. \quad (8)$$

1.2 聚丙烯纤维混凝土导热系数计算模型

基于原位测试和微细观材料表征结果,水泥基材料是具有典型多尺度特征的复合材料,因此可以通过在不同尺度上建立相应的描述模型,从而计算材料从微观到宏观的传热特性.本文采用的聚丙烯纤维混凝土导热系数的多尺度模型如图 1 所示.值得注意的是,1.1 节的推导是针对复合材料的基本属性及不同组分间的相互作用而言的,因此该方法可以用于在不同尺度上对复合材料的导热系数进行预测.以下针对每个尺度的构成特点,逐步计算不同尺度的等效导热系数.为了便于讨论和比较,采用了无量纲化参数 k_{eff}/k_m (即复合材料整体的等效导热系数和基体材料的导热系数之比)来表达模型计算结果.

1.2.1 尺度 I: 水泥净浆

水泥净浆作为本文中多尺度模型的最小尺度,其主要由水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙、未水化的水泥熟料和孔隙构成.为了简化计算,假定全

部固相组分作为基体,毛细孔作为球形夹杂相,基于两相复合材料的导热系数计算式(8)求得水泥净浆的导热系数为

$$\frac{k_{\text{eff}, I}}{k_s} = \frac{k_{\text{cap}}/k_s + 2 + 2(k_{\text{cap}}/k_s - 1)\varphi_{\text{cap}}}{k_{\text{cap}}/k_s + 2 - (k_{\text{cap}}/k_s - 1)\varphi_{\text{cap}}}. \quad (9)$$

其中: $k_{\text{eff}, I}$ 为水泥净浆的等效导热系数; k_s 和 k_{cap} 分别为固相基体和孔隙夹杂相的导热系数; φ_{cap} 为毛细孔在水泥净浆中的体积分数,可由 Powers 水泥水化模型求得^[13],

$$\varphi_{\text{cap}} = \frac{m_w/m_c - 0.36\beta}{m_w/m_c + 0.32}. \quad (10)$$

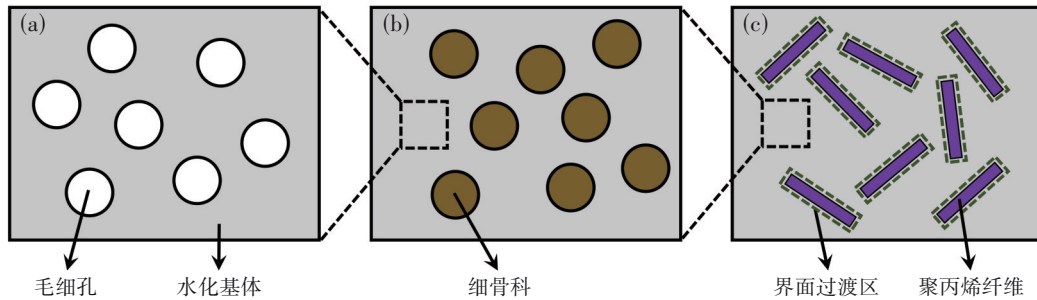


图1 聚丙烯纤维混凝土微观结构的多尺度划分和组分构成示意图

Fig. 1 Multiscale division and composition schematic diagram of the microstructures of polypropylene fiber reinforced concrete

(a)一尺度I:水泥净浆;(b)一尺度II:水泥砂浆/混凝土;(c)一尺度III:聚丙烯纤维混凝土。

1.2.2 尺度II:水泥砂浆/混凝土

水泥砂浆/混凝土作为本文中多尺度模型的中间尺度,主要包括水泥净浆和细(粗)骨料。为简化计算,假定水泥净浆作为基体,细骨料作为球形夹杂相,同样可以根据式(8)求得水泥砂浆的导热系数,即用水泥净浆的等效导热系数 $k_{\text{eff}, I}$ 和骨料的导热系数 $k_{\text{aggregate}}$ 分别代替式(8)中的 k_m 和 k_i ,用骨料在水泥砂浆/混凝土中的体积分数 $\varphi_{\text{aggregate}}$ 代替 φ_i 。其中,细骨料在常温下的导热系数取为 $3.5 \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{W})$ ^[4],其体积分数可由砂浆/混凝土的配合比设计而求得。

1.2.3 尺度III:聚丙烯纤维混凝土

聚丙烯纤维混凝土作为本文中多尺度模型的最大尺度,主要包括水泥砂浆/混凝土基体和聚丙烯纤维。假定聚丙烯纤维为椭球状夹杂相,考虑其形状对于导热系数的影响,可以根据式(3)计算该尺度的等效导热系数为

$$\frac{k_{\text{eff}, III}}{k_{\text{eff}, II}} = \frac{1 + F_{a, f}\varphi_f}{1 - F_{b, f}\varphi_f}. \quad (11)$$

其中: φ_f 为纤维的体积分数; $k_{\text{eff}, II}$ 为水泥砂浆/混凝土的导热系数; $k_{\text{eff}, III}$ 为聚丙烯纤维混凝土的导

热系数,其余参数可以参照式(4)~(7)求得。为了进一步考虑聚丙烯纤维的相变对混凝土高温下导热系数的影响,对纤维的体积进行如下修正:

1)在常温下,由于纤维和混凝土之间存在多孔的界面过渡区,因此聚丙烯纤维的加入会增加混凝土基体的孔隙率,这一额外的孔隙体积可表示为

$$\Delta V_{f, \text{ITZ}} = \frac{\pi l_f}{4} \left[(2t_{f, \text{ITZ}} - d_f)^2 - d_f^2 \right]. \quad (12)$$

其中: l_f 和 d_f 分别为纤维的长度和直径; $t_{f, \text{ITZ}}$ 为界面过渡区的厚度,本文取为 $50 \mu\text{m}$ 。

2)聚丙烯纤维在高温下发生熔化,由此产生的松弛效应也会增加额外的孔隙体积 $\Delta V_{f, \text{relax}}$ ^[16]:

$$\Delta V_{f, \text{relax}} = \begin{cases} 0, & T < T_{P0}; \\ \beta \frac{T - T_{P0}}{T_{P0} - T_{P1}}, & T_{P0} \leq T \leq T_{P1}; \\ \beta, & T_{P1} \leq T \leq T_{P2}. \end{cases} \quad (13)$$

其中: T_{P0} 和 T_{P1} 分别为聚丙烯纤维熔化的起止温度; β 为根据试验结果确定的松弛系数。

3)随着温度的进一步升高,聚丙烯纤维的蒸发会进一步增加混凝土基体的孔隙率^[17]:

$$\Delta V_f(T) = \frac{V_f}{1 + \exp\left[\xi(\tilde{\omega} - l_f)\right]}, T_{p2} < T \leq T_{p3}. \quad (14)$$

其中: V_f 为常温下的纤维体积; T_{p2} 和 T_{p3} 分别为聚丙烯纤维蒸发的起止温度. 对于聚丙烯纤维而言, 其熔化过程的起止温度为 165 °C 和 200 °C, 其蒸发过程的起止温度为 325 °C 和 475 °C, 其特征参数 ξ 和 $\tilde{\omega}$ 分别根据试验结果拟合为 2.5 和 3.0^[17].

2 模型验证与参数分析

2.1 水泥净浆尺度验证

图 2a 给出在不同水化程度下, 水泥净浆的等效导热系数随水灰比变化以及与试验数据^[1,18]的对比情况. 可以看出, 等效导热系数随着水灰比的增加而减小. 这是因为随着水灰比的增加, 水化产物的体积分数不断减小, 相应地水泥净浆的孔隙率不断上升. 考虑到毛细孔的导热系数(即空气的导热系数)远小于水泥水化产物的导热系数, 孔隙对水泥净浆的传热性能起到抑制作用, 因此孔隙率的增加会导致等效导热系数的减小. 同理, 随着水化程度的增加, 孔隙率的减少会导

致等效导热系数的增大. 此外, 基于水化程度为 0.8 的预测结果与试验结果拟合程度最好, 这也符合水泥基材料养护 28 d 后的水化程度约为 0.8 的预期.

图 2b 给出在不同水灰比下, 水泥净浆的等效导热系数随温度变化的情况. 显而易见, 等效导热系数随着温度升高显著减小, 这一现象与水分的迁移和水化产物在高温下的分解密切相关. 当温度升至 100 °C 左右时, 水泥净浆中的自由水开始大量蒸发; 随着温度进一步升高至 120 °C 以上, 水化硅酸钙凝胶开始逐步分解, 并释放内部的物理吸附水; 当温度达到 400 °C, 氢氧化钙开始分解成氧化钙, 并释放化学结合水^[19]. 这一系列理化反应过程导致水化产物不断减少, 而孔隙率却不断升高. 因此, 水泥净浆的等效导热系数不断减小. 由于水灰比较高的水泥净浆本身具有较高的孔隙率, 所以高温下的导热系数也随着水灰比的增加而进一步减小. 虽然缺少尺度 I 的相关试验数据作为验证, 但尺度 I 的预测结果会作为尺度 II 的输入参数, 尺度 I 预测结果的准确性可以在尺度 II 中进一步检验.

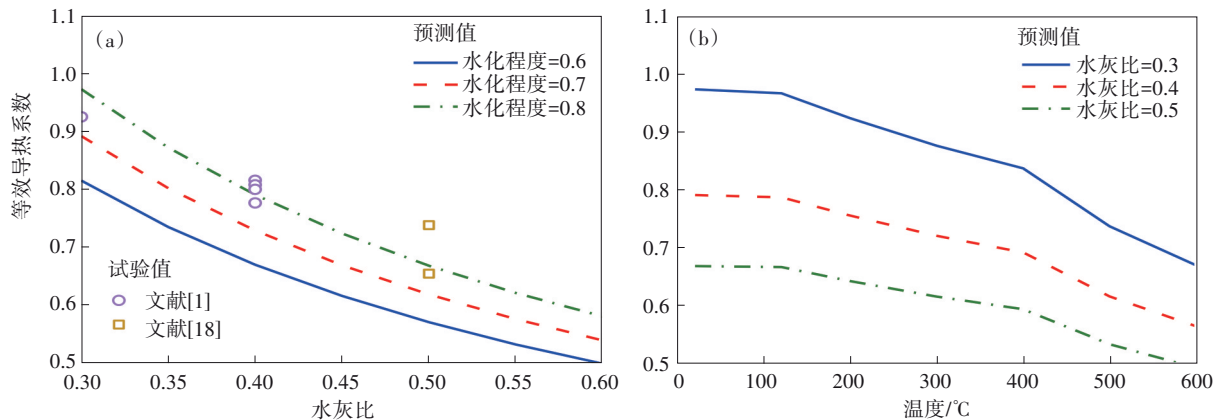


图 2 水泥净浆等效导热系数随水灰比和温度的变化

Fig. 2 The variations of equivalent thermal conductivity of cement paste with respect to water-to-cement ratio and temperature

(a)—水灰比; (b)—温度.

2.2 水泥砂浆/混凝土尺度验证

图 3a 绘制了水泥砂浆/混凝土导热系数随着骨料掺量的变化情况. 从预测结果和试验结果^[2,4]的对比情况可知, 模型的预测结果较为准确, 能够反映不同骨料掺量对于等效导热系数的影响. 由于骨料的导热系数高于水化产物和水泥熟料的导热系数, 因此掺加粗/细骨料对混凝土的等效导热系数有促进作用, 并且这种促进作用随着骨料掺量的增加而增大. 值得注意的是, 虽然水泥

净浆的等效导热系数随着水灰比的增大而减小, 但是在骨料体积分数保持不变的条件下, 掺加骨料对于水灰比较大的水泥净浆的等效导热系数有较大的提升作用. 这是因为对于等效导热系数 (k_{eff}/k_m) 而言, 水灰比越大意味着基体的导热系数 (k_m) 越小, 对骨料的影响越大, 所以图 3a 出现了等效导热系数随水灰比增大而增大的变化趋势.

由于骨料的导热系数受骨料种类的影响很大, 且其导热系数随温度的变化也不尽相同. 本

文模型计算中,根据已有的试验数据进行线性拟合作为骨料高温导热系数的输入参数.图3b反映了温度对于水泥砂浆导热系数的影响.可以看到,预测结果与试验结果^[20]有较好的吻合度,特别是在300℃以下范围内.与尺度I类似,水泥砂浆的等效导热系数也随着温度的升高而显著下降.这是由于骨料的导热系数在高温下不断下降导致的,且骨料的导热系数随温度下降的速度比

水泥净浆更快.值得注意的是,等效导热系数在600℃高温下,依然大于1.35.而等效导热系数大于1.0,说明骨料在高温下依然对水泥砂浆的导热系数有促进作用.因此,仅从导热系数这一角度评价,骨料的掺加对于建筑材料的隔热是不利的.骨料在不同温度下传热特性的显著变化特征可以有助于储能构筑物的建造^[21].

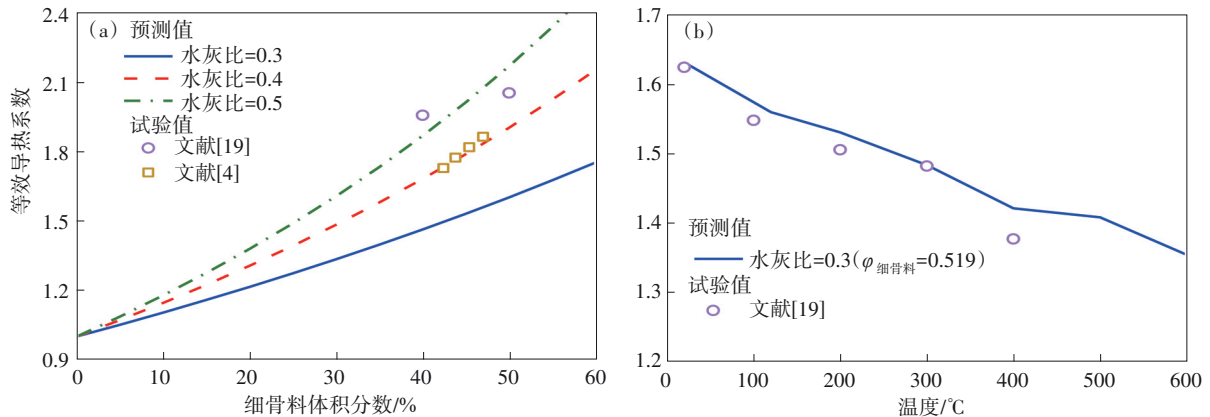


图3 水泥砂浆等效导热系数随细骨料体积分数和温度的变化

Fig. 3 The variations of equivalent thermal conductivity of cement mortar with respect to volume fractions of the fine aggregate and temperature

(a)—细骨料体积分数;(b)—温度.

2.3 聚丙烯纤维混凝土尺度验证

本文以聚丙烯纤维为算例验证了模型在尺度III的准确性.在常温条件下,由于聚丙烯纤维的导热系数小于水泥净浆的导热系数,对等效导热系数有抑制作用.因此随着聚丙烯掺量的增加,纤维混凝土的导热系数显著下降(如图4a所示).此外,在纤维掺量一定的条件下,水灰比越大的混凝土基体的等效导热系数有较小幅度的下降.这是因为水灰比大的基体本身有较小的导热系数(如2.1节所述),所以掺入低导热性纤维的负面影响较小.图4b绘制了聚丙烯纤维混凝土在高温下导热系数的变化情况,并与已有的试验数据^[19]进行了对比.由于聚丙烯纤维在高温下会发生物相变化,导致其导热系数进一步下降,从而使聚丙烯纤维混凝土的导热系数也随温度不断降低.更重要的是,如果不考虑纤维物相变化对其体积和导热系数的影响,那么预测结果与试验结果在高温下会有一些的误差,且误差随着温度的升高而不断增大.相比之下,根据式(10)~(12)修正后的纤维体积计算出的等效导热系数与试验结果拟合程度更好,即便在温度达到400℃时二者依然有很好的 consistency (误差小于

0.2%).

2.4 参数敏感性分析

为了进一步量化聚丙烯纤维对混凝土高温导热系数的影响,图5a绘制了在不同纤维掺量下,聚丙烯纤维混凝土等效导热系数随温度的变化情况.总的来讲,虽然增加纤维掺量和升高温度都会导致等效导热系数的下降,但是受纤维体积分数的影响更大.这主要是因为尺度III上,温度对等效导热系数的间接影响主要体现在纤维熔化和蒸发等理化反应导致的纤维导热系数的变化,以及由此引起的混凝土基体孔隙率的变化.而纤维掺量的改变则可以直接影响复合材料整体的导热性,特别是直径为微米级的纤维可以在混凝土基体中形成均匀分布的纤维网络,进而改善水泥基材料在高温下的传热特性.

图5b从材料设计的角度给出了等效导热系数随着纤维长径比变化的情况.可以看到,纤维的长径比越接近于1.5,其对等效导热系数的影响越大.由于聚丙烯纤维的导热系数较小,对混凝土的导热系数有抑制作用.随着长径比的不断增大,纤维对等效导热系数的影响逐渐减小,进而表现为等效导热系数的缓慢增大.尤其是在长

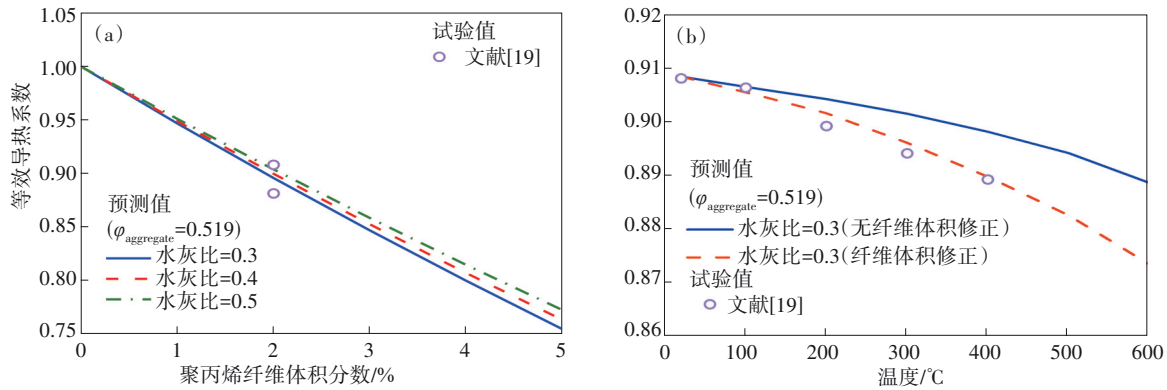


图4 聚丙烯纤维混凝土等效导热系数随纤维体积分数和温度的变化

Fig. 4 The variations of equivalent thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced concrete with respect to volume fraction of polypropylene fiber and temperature

(a)—聚丙烯纤维体积分数; (b)—温度.

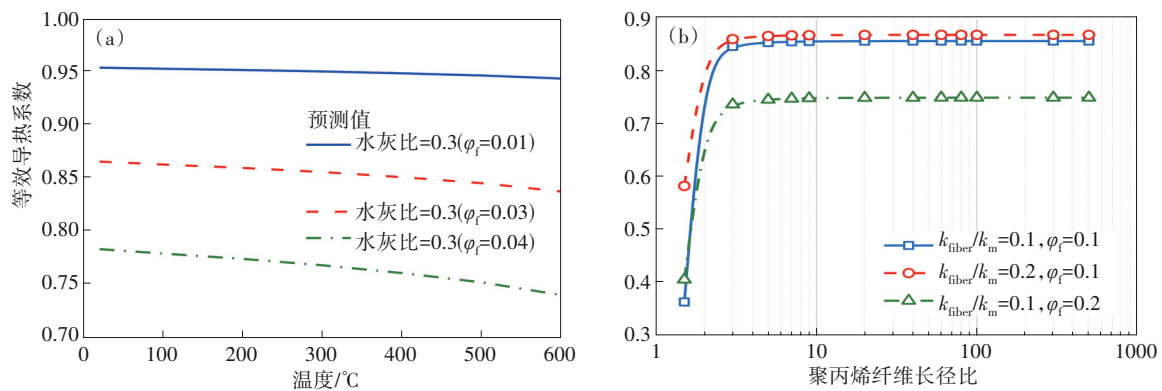


图5 聚丙烯纤维混凝土等效导热系数随温度和纤维长径比的变化

Fig. 5 The variations of equivalent thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced concrete with respect to temperature and aspect ratio of polypropylene fiber

(a)—温度; (b)—聚丙烯纤维长径比.

径比小于10时,纤维形状对于导热系数的影响起主要作用,而纤维的导热系数(k_{fiber}/k_m)和纤维掺量(φ_f)的影响相对较小.但是,当长径比大于10时,等效导热系数几乎不再受到纤维形状的影响,此时纤维自身的传热性能和纤维掺量对于纤维混凝土的导热系数起到决定性作用.与之前的分析相似,纤维掺量对于等效导热系数的影响相对更大.具体来说, k_{fiber}/k_m 从0.1上升至0.2,等效导热系数的增幅小于2%;而当纤维的体积分从0.1上升至0.2时却导致等效导热系数产生超过10%的降幅.综上所述,考虑到纤维普遍具有较大的长径比,因此仅从导热系数角度分析,改变纤维长径比对于混凝土的传热性能影响不大.但是,优化纤维的长度对于纤维在混凝土基体中的合理分布,以及相应地改变混凝土结构温度场分布和防止爆裂性剥落仍具有一定的实际意义.

3 结 论

1) 基于聚丙烯纤维混凝土的微细观构成和等效介质化方法,在水泥净浆、水泥砂浆/混凝土和纤维混凝土3个尺度上,建立了聚丙烯纤维混凝土高温下等效导热系数多尺度计算模型.结果表明,考虑了聚丙烯纤维高温相变后的预测结果与试验结果有很好的吻合度.

2) 温度升高在不同尺度上均会导致混凝土等效导热系数的下降,这与水化产物分解、水分蒸发、骨料导热系数下降以及纤维相变紧密相关.而水灰比对等效导热系数的影响在不同尺度上却不尽相同,其对导热系数的影响主要与孔隙率的变化相关.

3) 通过参数敏感性分析发现,聚丙烯纤维自身的传热性能和纤维形状对于等效导热系数的影响不大,而纤维掺量对等效导热系数的影响起

到主要作用.但是,若在搅拌和浇筑过程中发生聚丙烯纤维结团的现象,并产生长径比小于10的“纤维团”,则会对混凝土的高温传热性能产生较大影响,应尽量避免这种情况的发生.

参考文献:

- [1] Kim K H, Jeon S E, Kim J K, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(3): 363-371.
- [2] Zhang W P, Min H G, Gu X L, et al. Mesoscale model for thermal conductivity of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 8-16.
- [3] 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 Wei-ping, Tong Fei, Xing Yi-shan, et al. Experimental study and prediction model of thermal conductivity of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2): 183-189.)
- [4] Liu K, Lu L, Wang F, et al. Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 465-475.
- [5] 刘凯, 王芳, 王选仓. 水泥混凝土导热性能影响因素及预估模型研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(6): 771-777. (Liu Kai, Wang Fang, Wang Xuan-cang. Influence factor of thermal conductivity of cement concrete and its prediction model [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(6): 771-777.)
- [6] Wang Y Y, Ma C, Liu Y F, et al. A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 387-399.
- [7] 王莹莹, 马超, 刘艳峰, 等. 含水量对混凝土导热系数的影响分析[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4): 595-599. (Wang Ying-ying, Ma Chao, Liu Yan-feng, et al. Effect of moisture content on thermal conductivity of concretes [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(4): 595-599.)
- [8] Zhang D, Tan K H. Effect of various polymer fibers on spalling mitigation of ultra-high performance concrete at high temperature [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103815.
- [9] Lin J F, Zhang Y, Guo Z H, et al. Impact of synthetic fibers on spalling and intrinsic pore structure of ultra-high performance concrete (UHPC) under elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 439: 137325.
- [10] Gong J H, Ma Y W, Fu J Y, et al. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: a review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 241: 109995.
- [11] Zeng Q, Fang R, Li H D, et al. Tailoring the thermal and mechanical properties of lightweight cement-based composites by macro and micro fillers [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 102: 169-184.
- [12] Zhang Y, Lei Q R, Zhao W G, et al. An improved micromechanical model for the thermal conductivity of multi-scale fiber reinforced ultra-high performance concrete under high temperatures [J]. *Materials & Design*, 2023, 236: 112503.
- [13] Powers T C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1958, 41(1): 1-6.
- [14] Abdolhosseini Q M J, Ulm F J, Pellenq R J. Physical origins of thermal properties of cement paste [J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(6): 064010.
- [15] Lee J, Xi Y P, Willam K, et al. A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(9): 754-762.
- [16] Khoury G A. Polypropylene fibres in heated concrete. part 2: pressure relief mechanisms and modelling criteria [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60(3): 189-204.
- [17] Mazzucco G, Majorana C E, Salomoni V A. Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions [J]. *Computers & Structures*, 2015, 154: 17-28.
- [18] Bentz D P. Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes [J]. *Materials and Structures*, 2007, 40(10): 1073-1080.
- [19] Zhu Y P, Hussein H, Kumar A, et al. A review: material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 123: 104212.
- [20] Zhang T, Zhang Y, Zhu H H, et al. Experimental investigation and multi-level modeling of the effective thermal conductivity of hybrid micro-fiber reinforced cementitious composites at elevated temperatures [J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 112988.
- [21] Roig-Flores M, Lucio-Martin T, Alonso M C, et al. Evolution of thermo-mechanical properties of concrete with calcium aluminate cement and special aggregates for energy storage [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 141: 106323.