

# 再生混凝土导热性能影响因素及研究进展

肖建庄<sup>1</sup>, 郝潞岑<sup>1</sup>, 曹万智<sup>2</sup>, 许碧菀<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院 上海 200092; 2. 西北民族大学土木工程学院 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 再生混凝土因掺入再生骨料使其内部微观结构、力学与热力学性能均与普通混凝土有所区别。目前,对再生混凝土力学性能已有较多研究,但对其热力学性能的关注则相对较少。针对影响再生混凝土导热性能的主要因素,如再生骨料性质与取代率、再生微粉、环境温度等,分析再生混凝土导热系数的变化规律。通过归纳分析现有试验数据,提出了再生混凝土导热系数经验预测公式。此外,现有研究表明,再生骨料孔隙率直接影响再生混凝土导热系数,掺入再生骨料和再生微粉后,混凝土的导热系数明显下降,细骨料全取代时下降幅度可达48%;随环境温度升高,混凝土导热系数明显降低。

**关键词:** 再生混凝土;导热系数;再生骨料;再生微粉;功能化

中图分类号: TU375

文献标志码: A

for predicting the thermal conductivity of RAC is proposed. Existing studies show that the porosity of RCA affects the thermal conductivity of RAC. The incorporation of RCA and recycled concrete powder as well as the increase of ambient temperature can lead to a significant decrease in the thermal conductivity of concrete and with 100% recycled fine aggregate, the reduction of thermal conductivity can reach 48%. Functionalized RAC together with an enhanced mechanical performance would promote a wider industrial application and lead to less CO<sub>2</sub> emission of the construction industry.

**Key words:** recycled concrete; thermal conductivity; recycled aggregate; recycled powder; functionalization

## Review on Thermal Conductivity of Recycled Concrete

XIAO Jianzhuang<sup>1</sup>, HAO Lucen<sup>1</sup>, CAO Wanzhi<sup>2</sup>, XU Biwan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** Recycled aggregate concrete (RAC) is different from ordinary concrete in its internal microstructure, mechanical and thermodynamic properties due to the addition of recycled concrete aggregates (RCA). At present, there have been many studies on the mechanical properties of RAC, but less attention has been paid to its thermodynamic properties. In this paper, effects of several important factors such as physical properties and replacement level of RCA, recycled concrete powders, and service temperature on the thermal conductivity of RAC are reviewed. Based on the experimental data in literature, an empirical equation

建筑行业不但耗能巨大,同时也排放大量的CO<sub>2</sub>。全球建筑行业每年消耗的电能和排放的CO<sub>2</sub>分别以年均2.5%和1.0%的速度增长<sup>[1]</sup>。在建筑行业消耗的能源中,房屋制冷和制热能耗所占比例约为20%;相关研究预测2050年制热和制冷能耗会占到建筑总能耗的50%以上<sup>[2]</sup>。导热系数是混凝土传热性能的重要指标。导热系数较低的混凝土可以阻碍建筑传热和降低建筑能耗。Real等<sup>[3]</sup>研究表明,与普通混凝土相比,在建筑中使用轻骨料混凝土,可以降低15%的采暖能耗。而混凝土的导热系数与骨料的物理性质有着密切的关系,如骨料的孔隙率和密度等。

城镇化进程产生了大量的建筑固体废弃物,目前中国每年产生大约1 800万t建筑固体废弃物<sup>[4]</sup>,占城市垃圾的30%~40%;且未来10年建筑固体废弃物的排放量还将持续提高<sup>[5]</sup>。因此,建筑固体废弃物的资源化是行业发展的必然要求和基本方向。目前,利用再生骨料与再生粉体制备混凝土(即再生

收稿日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(52078358)

第一作者: 肖建庄(1968—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为再生混凝土材料与结构。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

混凝土)的相关研究,关注点主要集中于再生混凝土力学性能和耐久性能等方面<sup>[6-7]</sup>。再生骨料因表面附着老砂浆,孔隙率较高,密度低于天然骨料,吸水率高于天然骨料,其所制备混凝土力学性能和耐久性均较普通混凝土弱<sup>[6-7]</sup>。然而,较高的孔隙率使得再生骨料的导热系数低于天然骨料,因此掺入再生骨料势必会影响混凝土的热工性能<sup>[1]</sup>。Sargam<sup>[8]</sup>等研究表明,掺入再生骨料可以明显降低混凝土的导热系数。近年来,使用再生微粉取代部分水泥制备混凝土的研究逐年增加;相关研究表明<sup>[9]</sup>,掺入再生微粉会明显影响混凝土孔隙率、密度和强度等。

目前已有较多关于再生骨料和再生微粉对再生混凝土力学性能和耐久性能研究的综述<sup>[10-11]</sup>,但关于再生混凝土热力学性能的综述还较少。本文重点总结再生混凝土导热性能研究进展,分析关键影响因素,如再生骨料性质与取代率、再生微粉及环境温度等对再生混凝土材料导热性能的影响。

## 1 混凝土导热系数理论

如表1所示,现有多孔复合材料导热系数模型主要包括并联模型、串联模型、Maxwell-Eucken模型、有效介质理论和Russel模型<sup>[12-13]</sup>。在这些模型基础上,Harmathy等<sup>[14]</sup>进一步考虑混凝土孔隙率、等效固体导热系数及含湿量的影响提出混凝土导热系数计算公式。Campbell-Allen等<sup>[15]</sup>则基于粗骨料相和砂浆相,提出另一混凝土导热系数预测模型。Khan<sup>[16]</sup>就Harmathy和Campbell-Allen and Thorne模型进行了试验验证,发现Campbell-Allen and Thorne计算模型在粗骨料导热系数较低时,模型准确度较高;然而随着粗骨料导热系数的增大,该模型预测值超出试验测试值的13%~32%;而Harmathy公式的预测值则超出实际值17%~49%。

混凝土为一种多相复合材料,主要包括连续相水泥砂浆、分散相粗骨料、骨料和水泥砂浆之间的界面过渡区及孔隙。因此,采用两相导热系数模型来计算混凝土导热系数存在一定误差。Wang等<sup>[12]</sup>通过定义一个考虑组份相数和几何维度的参数建立了统一方程用来计算多相复合材料导热系数。Gong等<sup>[17]</sup>提出了一种新的有效介质理论用来计算多相或者多组分复合材料的导热系数,通过参数 $k_m$ 来定义固体相和空气相之间的热传导,相关公式见表1。王立成等<sup>[18]</sup>在Maxwell理论的基础上提出了水泥砂浆、界面过渡区单元以及宏观混凝土导热系数的预

表1 多孔复合材料导热系数模型

Tab.1 Thermal conductivity model of porous composite materials

导热系数模型	公式	材料相
并联	$k = v_1 k_1 + v_2 k_2$	两相
串联	$k = \frac{1}{v_1/k_1 + v_2/k_2}$	两相
Maxwell-Eucken1	$k = \frac{v_1 k_1 + v_2 k_2 \frac{3k_2}{2k_1 + k_2}}{v_1 + v_2 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}$	两相
Maxwell-Eucken2	$k = \frac{v_2 k_2 + v_1 k_1 \frac{3k_2}{2k_1 + k_2}}{v_2 + v_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}$	两相
有效介质理论	$v_1 \frac{k_1 - k}{k_1 + 2k} + v_2 \frac{k_2 - k}{k_2 + 2k} = 0$	两相
Russel <sup>[13]</sup>	$k = \frac{k_1 \frac{v_2^{2/3} + (1 - v_2^{2/3})k_1}{k_2(v_2^{2/3} - v_2) + (1 - v_2^{2/3})k_1}}{k_2(v_2^{2/3} - v_2) + (1 - v_2^{2/3})k_1}$	两相
Harmathy <sup>[14]</sup>	$k = \frac{2k_1 + k_2 - 2v_2(k_1 - k_2)}{2k_1 + k_2 + v_2(k_1 - k_2)}$	两相
Campbell-Allen and Thorne <sup>[15]</sup>	$k = \frac{k_1 k_2 (2M - M^2) + k_1 k_2 (1 - M)^2}{k_2 M + k_1 (1 - M)}$	两相
Wang <sup>[12]</sup>	$\sum v_i \left( \frac{k_i - k}{k_i + 2k_m} \right) = 0$	多相
Gong <sup>[17]</sup>	$k = \frac{\sum_{i=1}^m v_i k_i \frac{d_i k}{(d_i - 1)k + k_i}}{\sum_{i=1}^m v_i \frac{d_i k}{(d_i - 1)k + k_i}}$	多相

注: $k$ 为有效导热系数; $k_1$ 为连续相材料导热系数; $k_2$ 为分散相材料导热系数; $v_1$ 为连续相材料体积分数; $v_2$ 为分散相材料体积分数; $k_i$ 为第*i*相的导热系数; $v_i$ 第*i*相的体积分数; $M=1-(1-P)^{1/3}$ , $P$ 为单位体积内混凝土中砂浆的体积分数; $d_i$ 为球形分散相体积分数; $k_m$ 为球形分散相导热系数。

测模型。Chu等<sup>[19]</sup>将混凝土认为是固-液-气三相,基于串、并联导热系数模型,假设串、并联模型随机分布在混凝土内部,建立了混凝土三相导热系数计算模型。陈春等<sup>[20]</sup>基于最小热阻理论,考虑混凝土内部孔隙作用,建立了基于砂浆相、骨料相和孔隙相的三相混凝土导热系数模型,计算了8种混凝土导热系数,计算结果与试验结果的误差在-14.0%~5.1%之间,而采用Campbell-Allen and Thorne模型

计算的结果误差在 11.0%~32.1% 之间,这说明三相混凝土导热系数模型的计算误差低于两相模型。

如图 1 所示,再生混凝土内部包括新水泥砂浆、旧水泥砂浆、粗骨料、新界面过渡区、旧界面过渡区,并且这些相中均包含一定量的孔隙,采用现有的两相或者三相模型进行再生混凝土导热系数预测将会出现一定的误差。目前关于再生混凝土导热系数模型还停留在基于试验数据的经验拟合,以及对现有导热系数模型的修正。Zhu 等<sup>[21]</sup>通过定义再生骨料物理性能以及取代率的影响因素  $c$  对 Campbell-Allen and Thorne 模型进行修正,建立了再生混凝土导热系数模型,见公式(1)和(2)。Ngohpok 等<sup>[22]</sup>通过对试验数据拟合,得到了再生混凝土导热系数与密度的关系式,如公式(3)所示。

$$k = k_1(2M - M^2) + \frac{k_1 k_2 (1 - M)^2}{k_2 M + k_1 (1 - M)} - 0.00101c - 0.13579 \quad (1)$$

$$c = \eta_1 q_1 + (1 - \eta_1) q'_1 + \alpha \eta_2 q_2 \quad (2)$$

式中: $\eta_1$ 为再生粗骨料取代率; $q_1$ 为再生粗骨料压碎指标; $q'_1$ 为天然粗骨料压碎指标; $\eta_2$ 为再生细骨料取代率; $q_2$ 为再生细骨料压碎指标; $\alpha$ 折减系数,通过试验确定。

$$k = 0.3549 e^{0.0005\rho} \quad R^2 = 0.97 \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为再生混凝土的表观密度。

从图 1 可以看出,由于老砂浆的存在,再生粗骨料的导热系数与天然粗骨料存在较大差别,肖建庄等<sup>[23]</sup>认为再生粗骨料的导热系数与普通混凝土一致。再生混凝土中存在两种骨料,因此在计算其导热系数时,需要考虑再生骨料和天然骨料组合下的骨料导热系数。肖建庄等<sup>[23]</sup>基于并联传热和串联传热理论计算不同再生骨料取代率下的骨料组合等效导热系数,进而计算再生混凝土导热系数。

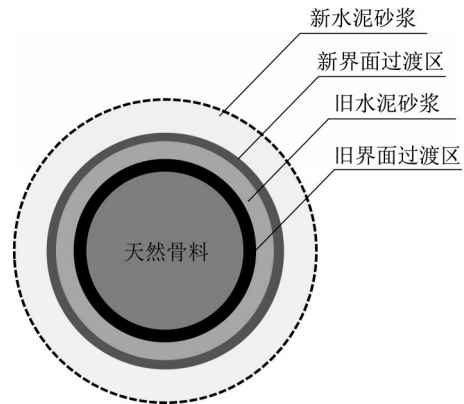


图 1 再生混凝土细观示意图

Fig. 1 Schematic microstructure of recycled aggregate concrete

采用现有 Harmathy 模型<sup>[14]</sup>、Campbell-Allen and Thorne 模型<sup>[15]</sup>和 Zhu 修正后的混凝土导热系数模型<sup>[21]</sup>对文献[24]中的再生混凝土进行导热系数计算。选取天然粗骨料导热系数  $2.913 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,天然细骨料导热系数  $3.086 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,水泥导热系数  $1.233 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,水导热系数  $0.576 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,再生粗骨料导热系数视为与普通混凝土一致,取  $1.890 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ <sup>[21]</sup>。计算结果与试验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,Campbell-Allen and Thorne 模型、Harmathy 模型计算结果与试验结果均有较大误差,Zhu 等人修正后的再生混凝土模型计算的结果与试验误差较前两种相对较小,但是误差依旧在 10% 以上。这主要是因为再生骨料来源不同,导致其导热性能离散性较大。因此,在计算再生混凝土导热系数时,不能简单将再生骨料导热系数等同于普通混凝土,需针对再生骨料的物理性质(如表面旧砂浆含量、孔隙率等)建立相应的再生混凝土导热系数计算模型。

表 2 相关导热系数模型计算值与试验值比较

Tab.2 Comparison of calculated and experimental values of relevant thermal conductivity models

再生粗骨料 取代率/%	导热系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )			
	试验值	Campbell-Allen and Thorne 模型	Zhu 模型	Harmathy 模型
0	1.89	2.35 (24.3%)	2.19 (15.9%)	2.34 (23.8%)
50	1.65	2.09 (26.7%)	1.95 (18.1%)	2.10 (27.3%)
100	1.52	1.86 (22.5%)	1.71 (12.8%)	1.86 (22.5%)

注:括号中数值为与试验数值的误差。

## 2 影响再生混凝土导热系数的因素

混凝土连续相和非连续相的物理性质直接影响

混凝土的导热性能。影响再生混凝土导热系数的主要因素包括再生骨料性质、再生微粉性质及其取代率等;同时,相关研究<sup>[1]</sup>表明测试温度也会对混凝土

导热系数产生影响。具体试验数据如表3所示,详细对比分析如下文所述。

表3 再生混凝土试验数据摘要

Tab.3 Summary of experimental test database of recycled aggregate concrete

文献	RP 取代率/ %	RCA 密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RCA 吸水率/ %	RCA 取代率/ %	RFA 密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RFA 吸水率/ %	RFA 取代率/ %	测试 温度/ °C	混凝土 干密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	强度/ MPa	导热系数/ ( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )
[25]	0	2.12	7.06	0~100					2 055~2 279	28.0~41.0	0.86~1.21
[26]	0	2.44	6.60	100	2.42	9.0	100		2 152~2 206	21.5~31.7	1.36~2.04
[27]	0			0~100			0~100	20~30	2 120~2 340		0.61~0.75
[22]	0	2.62	6.50	0~100					1 739~1 881	12.1~14.2	0.82~1.00
[28]	0			40~50					2 064~2 105	43.9~50.8	0.86~0.87
[21]	0	2.52~2.60	3.50~4.67	40~100	2.49	10.9	40~100		1 619~1 955		0.73~1.06
[29]	0~30	2.07	9.10	0~50					1 990~2 290	18.3~42.8	1.82~2.06
[30]	0	2.09~2.14	8.40~8.60	0~100	2.07~2.11	10.1~12.9	0~100		2 193~2 364		1.21~2.10
[24]	0	2.50	4.40	0~100				20~790	2 163~2 377		0.81~1.89
[31]	0	2.17~2.18	6.40~7.00	0~100				22~300		31.2~81.2	1.20~2.16
[32]	0	2.55~2.62	5.47~6.85	0~100					22 046~2 250		1.13~1.54
[33]	0			0~100							1.39~1.62
[34]	0~7	2.60	3.95	0~100	2.47		0~100		1 776~2 167	26.3~45.2	0.88~1.58
[35]	0	2.50	4.40	0~100	2.22	11.2	0~100		2 143~2 470	49.3~66.4	0.72~1.98

注:RP (recycled powder)为再生微粉;RCA (recycled coarse aggregate)为再生粗骨料;RFA (recycled fine aggregate)为再生细骨料。

## 2.1 再生骨料物理性能

不同来源的再生骨料物理性能差别较大,因而对所制备的再生混凝土导热性能影响不同。Miguel等<sup>[30]</sup>研究发现当再生粗骨料取代率为100%时,掺有两种不同来源再生粗骨料的混凝土导热系数分别为1.7和1.6  $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。此外,不同来源再生细骨料对混凝土导热系数性能影响更大,如掺有两种不同来源再生细骨料的再生混凝土导热系数分别为1.2和1.6  $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。Laneyrie等<sup>[31]</sup>研究了实验室制备的再生粗骨料和工厂生产的再生粗骨料对混凝土导热系数的影响,发现相同取代率下,两种再生混凝土的导热系数在常温下并无明显区别,但将混凝土加热至300 °C后,采用实验室制备的再生粗骨料拌合的混凝土的导热系数比后者高13%。

对表3进行数据分析得到不同骨料密度和吸水率对混凝土导热系数的影响,如图2所示。图2a为骨料密度与混凝土导热系数的关系图,可以看出,再生粗骨料密度基本低于 $2.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,再生粗骨料混凝土导热系数低于 $2 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。天然粗骨料(nature coarse aggregate, NCA)密度明显高于再生粗骨料,普通混凝土的导热系数也高于再生混凝土。并且随着骨料密度增加,骨料表面旧砂浆密实度增加,骨料的孔隙率降低,混凝土导热系数呈现增大趋势。

骨料的吸水率对混凝土的导热系数影响明显,Kazmi等<sup>[32]</sup>总结了不同骨料吸水率对混凝土导热系数的影响,其所拟合的骨料吸水率与混凝土导热系

数的经验公式如下:

$$k = -3.45X + 12.07 \quad R^2 = 0.61 \quad (4)$$

式中: $k$ 为混凝土导热系数; $X$ 为骨料吸水率。

图2b为骨料吸水率与混凝土导热系数关系图,可以看出,再生粗骨料的吸水率均大于4%,而天然粗骨料的吸水率均低于2%。使用吸水率较高的骨料的再生混凝土的导热系数也低于天然混凝土。因为再生骨料老砂浆的孔隙率要高于天然骨料,并且在混凝土破碎的过程中会对再生骨料造成一定的损伤,也使得再生骨料的孔隙率高于天然骨料,导致再生混凝土的导热系数低于普通混凝土。

Kazmi等<sup>[32]</sup>研究不同方式的再生骨料预处理方法对再生混凝土导热系数的影响,如表4所示。由表4可知,采用处理后再生粗骨料拌合的混凝土导热系数均有所增加,尤其是使用碳化+石灰水浸泡混合作用后的再生粗骨料,采用其拌合的混凝土与普通混凝土导热系数基本没有区别。因为碳化改性后,二氧化碳与未水化水泥发生反应生成碳酸钙,填补了再生骨料表面旧砂浆的部分孔隙,使得其孔隙率降低,进而导致再生混凝土导热系数增加。再生骨料浸泡石灰水后,骨料内部氢氧化钙丰富,再将骨料进行碳化改性,生成大量的碳酸钙充分填补骨料表面旧砂浆的孔隙,进而使得混凝土导热系数明显提升。机械研磨和酸浸泡的方法会将再生骨料表面的旧砂浆去除,进而使得骨料孔隙率降低,混凝土导热系数增加。

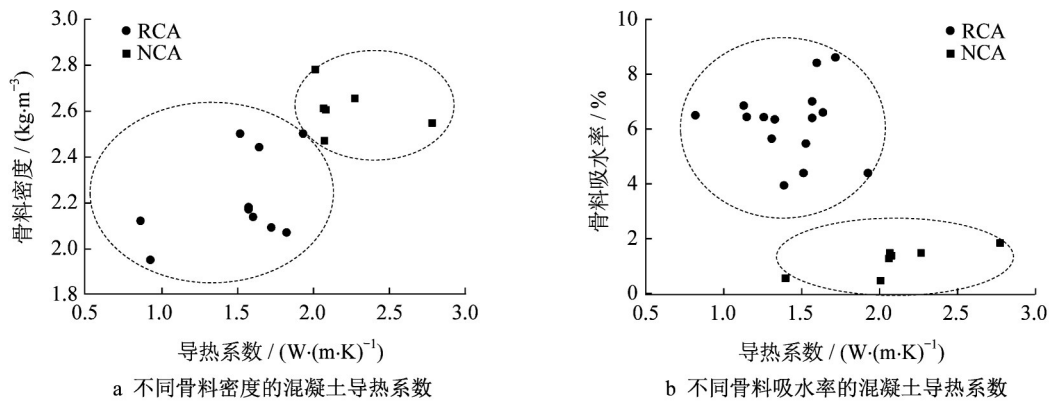


图2 混凝土导热系数

Fig.2 Thermal conductivity of concrete

表4 不同预处理再生粗骨料再生混凝土导热系数<sup>[32]</sup>

Tab.4 Thermal conductivity of RC with different preprocess of RCA

骨料类型	预处理方式	骨料孔隙率/%	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	导热系数变化量/%
天然粗骨料	无	3.19	1.54	
再生粗骨料	无	19.46	1.13	26.6
	碳化	14.39	1.31	14.9
	碳化+石灰水浸泡	11.65	1.53	0.6
	酸浸泡	15.94	1.15	25.4
	酸浸泡+机械研磨	15.31	1.33	13.6
	酸浸泡+碳化	15.79	1.24	19.5

2.2 再生骨料取代率

通过对表3进行数据分析得到不同再生粗、细骨料取代率对混凝土导热系数的影响,如图3和图4所示。图3a为不同再生粗骨料取代率的混凝土的导热系数,可以看出相同再生粗骨料取代率下混凝土的导热系数较为离散。为了进一步揭示再生粗骨料取代率对混凝土导热系数的影响,引入相对导热系数的概念,相对导热系数计算见公式(5)

$$k_r = k_n / k_0 \quad (5)$$

式中: $k_r$ 为相对导热系数; $k_n$ 为再生骨料取代率为 $n$ 时混凝土的导热系数; $k_0$ 为再生骨料取代率为0,即普通混凝土的导热系数。

不同再生粗骨料取代率的再生混凝土相对导热系数见图3b,随着再生粗骨料的增加,再生混凝土导热系数呈现一个下降的趋势。当再生粗骨料取代率为100%时,比普通混凝土,导热系数下降了11%~29%。

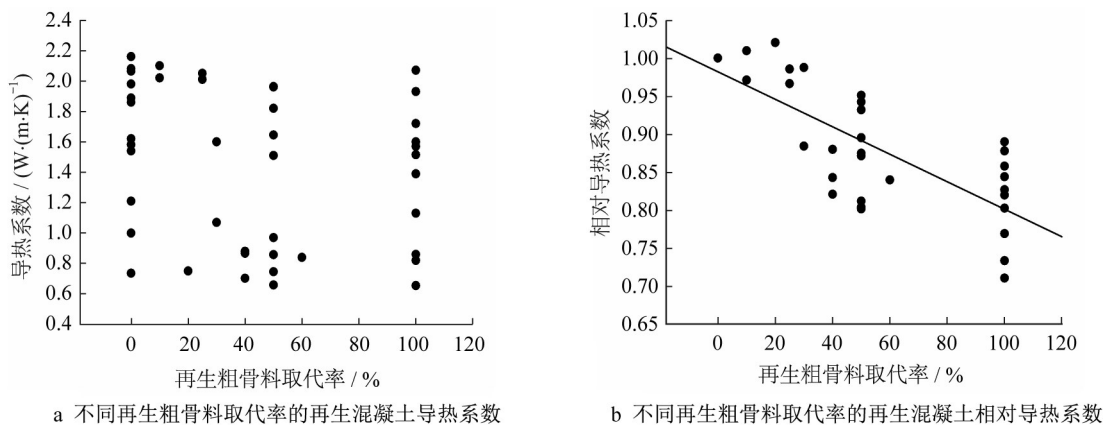


图3 再生粗骨料混凝土导热系数

Fig.3 Thermal conductivity of recycled coarse aggregate concrete

如图4所示,与再生粗骨料相似,不同再生细骨料取代率下的混凝土导热系数同样呈现较为离散的现象。但是随着再生细骨料取代率的增加,混凝土

的相对导热系数呈现下降的趋势。再生细骨料取代率为100%时,相比普通混凝土,导热系数下降了12%~48%。

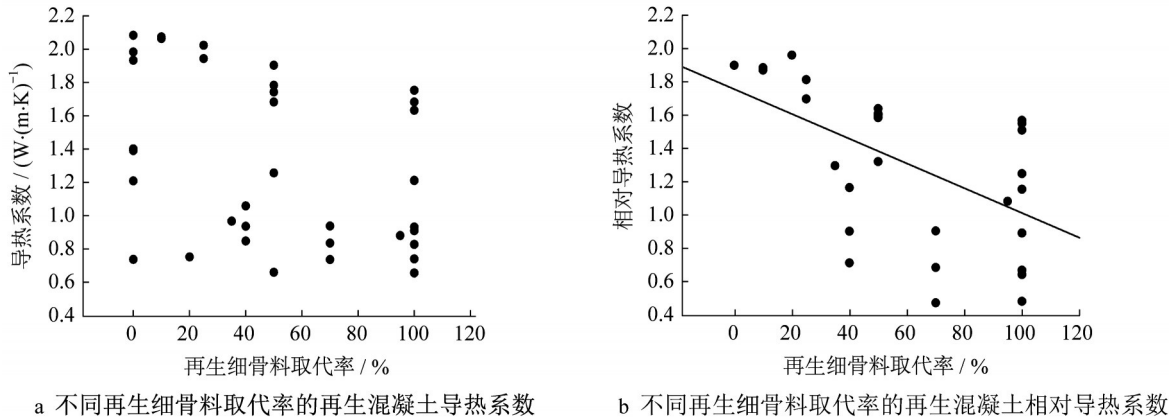


图4 再生细骨料混凝土导热系数

Fig. 4 Thermal conductivity of recycled fine aggregate concrete

相比于再生粗骨料取代率,相同取代率的情况下,再生细骨料混凝土导热系数的下降幅度要高于再生粗骨料混凝土,但是离散性也更大。这是因为再生细骨料相比于再生粗骨料孔隙率更高,再生细骨料性能波动也较大。并且再生细骨料中含有一定量的粉料,粉料含量和成份的不同对混凝土性能有很大的影响,进一步导致再生细骨料混凝土导热系数数据较为离散。

通过图3和图4可以看出,总体而言,随着再生粗、细骨料取代率的增加,混凝土导热系数降低,但是相同取代率的混凝土导热系数差异较大、离散性较高,对相对导热系数与再生骨料取代率进行线性回归,拟合度较低。通过前述研究已知,混凝土中各相材料占比对混凝土导热系数影响很大,需要进一步细化参数,进而得到更为理想的数据规律。众多研究表明,水灰比( $w/c$ ,质量比)对混凝土各项性能有着较大的影响。为了进一步细化分析再生骨料取代率对混凝土导热系数的影响,按水灰比将图3和图4中再生粗、细骨料混凝土导热系数根据水灰比0.4~0.5和0.5~0.6分为两类,并进行数据分析,结果如图5所示。通过对再生粗骨料混凝土导热系数进行拟合得到如下结果:

$$k_r = -0.0019x + 0.967 \quad R^2 = 0.65$$

$$0.4 \leq w/c < 0.5 \quad R^2 = 0.65 \quad (6)$$

$$k_r = -0.0017x + 1.007 \quad R^2 = 0.80$$

$$0.5 \leq w/c \leq 0.6 \quad R^2 = 0.80 \quad (7)$$

通过对再生细骨料混凝土导热系数进行拟合得

到如下结果:

$$k_r = -0.0012x + 0.995 \quad R^2 = 0.53$$

$$0.4 \leq w/c < 0.5 \quad R^2 = 0.54 \quad (8)$$

$$k_r = -0.0026x + 0.999 \quad R^2 = 0.67$$

$$0.5 \leq w/c \leq 0.6 \quad R^2 = 0.67 \quad (9)$$

式(6)~(9)中: $k_r$ 为再生混凝土相对导热系数; $x$ 为再生粗(细)骨料取代率。

通过公式(6)~(9)可以看出,当水灰比较大时,再生粗、细骨料混凝土导热系数数据离散程度降低,这可能是因为随着水灰比的增加,混凝土中液相的比例增加,降低了再生骨料性能波动对混凝土导热系数离散性的影响。但是这种细分方法还具有一定的局限性,数据拟合程度有所改善,但是数据拟合程度还处于一个相对较低的水平,尤其对于再生细骨料混凝土。

### 2.3 再生微粉

水泥胶凝材料的组成对混凝土导热系数也有着明显的影响, Demirboğa 等<sup>[36]</sup>研究表明,掺入30%的硅灰、粉煤灰和高炉渣后,砂浆的导热系数分别降低了40%、33%和14%。 Omrane 等<sup>[26]</sup>研究表明,火山灰材料替代水泥后可以明显降低再生混凝土的导热系数,当火山灰材料掺入20%时,再生混凝土导热系数从1.64 W·(m·K)<sup>-1</sup>降低至1.39 W·(m·K)<sup>-1</sup>,降低了15.2%。 Cantero 等<sup>[29]</sup>研究了再生微粉取代率为0~25%的普通混凝土和再生混凝土(再生粗骨料取代率为50%)的导热性能,结果如图6所示。从图6可以看出,随着再生微粉取代率的增加,普通混

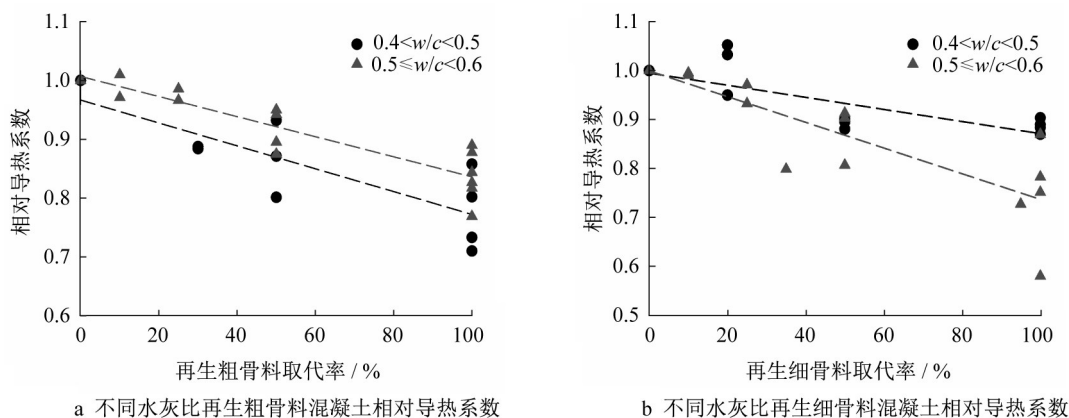


图5 不同水灰比再生骨料混凝土相对导热系数

Fig. 5 Relative thermal conductivity of recycled aggregate concrete with different water to binder ratios

凝土和再生混凝土的导热系数都呈线性降低,这说明再生微粉掺入混凝土后对混凝土的保温隔热性能有一定的改善作用。但也有研究发现,当再生微粉取代率较低时,对混凝土的导热系数影响较小。游帆等<sup>[34]</sup>分别使用再生微粉取代了3.5%和7.0%的水泥制备再生混凝土,试验发现,3种混凝土的导热系数差别在4%以内,影响甚微。

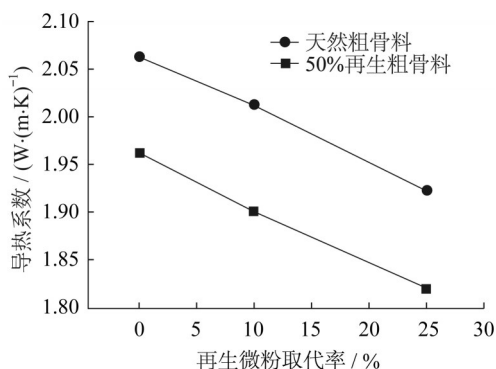
图6 再生微粉取代率对导热系数的影响<sup>[29]</sup>

Fig. 6 Effect of recycled powder replacement ratio on thermal conductivity

## 2.4 环境温度

已有研究表明,混凝土的导热系数随着温度的升高而降低<sup>[1, 37]</sup>。Zhao等<sup>[24]</sup>研究了再生粗骨料取代率为0~100%的再生混凝土在高温环境下的导热性能,结果如图7a所示,表明随着温度的升高和取代率增大,再生混凝土的导热系数降低,并且随着取代率的增加,混凝土导热系数降低量增加,相比于20℃,环境温度为800℃时,再生粗骨料取代率为0、50%和100%的混凝土导热系数分别降低了37%、42%和47%。潘凯楠<sup>[35]</sup>研究了再生细骨料取代率和再生粗细骨料耦合作用再生混凝土在

高温环境下的热工性能,研究结果如图7b所示,表明当温度小于300℃时,由于再生混凝土中水分散失,其导热系数迅速降低。当温度到达530℃时,由于氢氧化钙分解为氧化钙和水,导致混凝土内部湿度短暂提升,进而使得混凝土导热系数略有升高。当温度大于530℃小于800℃时,再生混凝土导热系数逐渐下降。图7中,RCA50表示再生粗骨料取代率为50%,RFA50表示再生细骨料取代率为50%,RCA100-RFA100表示再生粗细骨料取代率均为100%,以此类推。Laneyrie等<sup>[31]</sup>同样研究发现,随着再生混凝土温度升高,再生混凝土的导热系数降低。

## 3 再生混凝土导热系数预测公式

混凝土密度与混凝土内部孔隙率有明显的关系,增加混凝土的孔隙率会明显降低混凝土的密度,降低混凝土的导热系数。相关研究<sup>[38-42]</sup>总结了泡沫混凝土、喷射纤维混凝土、木质骨料混凝土等混凝土密度与导热系数的关系,结果如表5所示。从表5可以看出,各类混凝土的密度在 $374 \sim 1\,984 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,导热系数在 $0.116 \sim 1.99 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 之间,导热系数与密度具有较高的关联度( $R^2$ ),即随着混凝土密度的增加,其导热系数增加。

将表3中再生混凝土密度与导热系数数据(90组)进行拟合,结果如图8所示。从图8可以看出,再生混凝土导热系数与密度成指数关系,二者关联度较好。因此,可以用公式(10)来预测密度在 $1\,500 \sim 2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间的再生混凝土的导热系数。

$$k=0.063 \cdot 1e^{0.015\rho} \quad R^2=0.78 \quad (10)$$

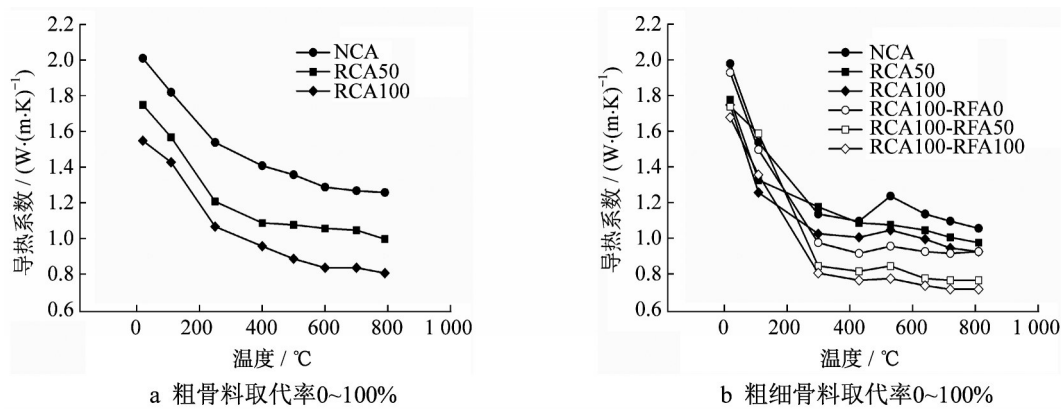


图7 再生骨料混凝土高温环境下的导热系数<sup>[24,35]</sup>

Fig. 7 Thermal conductivity of recycled aggregate concrete at an elevated temperature<sup>[24,35]</sup>

表5 不同混凝土的导热系数与密度的关系

Tab.5 Relationship between thermal conductivity and density of different concretes

混凝土类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	拟合公式
喷射纤维混凝土 <sup>[38]</sup>	374~416	0.116~0.125	$k=0.4228\rho-42.81$ $R^2=0.95$
泡沫混凝土 <sup>[39]</sup>	1100~1600	0.400~0.570	$k=-6e^{-7\rho^2}+0.0021\rho-1.2005$ $R^2=0.98$
膨胀聚苯乙烯轻骨料混凝土 <sup>[40]</sup>	1100~1700	0.600~1.990	$k=0.1930e^{0.1460\rho}$ $R^2=0.92$
气凝胶颗粒骨料混凝土 <sup>[41]</sup>	1000~1980	0.500~2.000	$k=0.0380e^{0.0019\rho}$ $R^2=0.98$
膨胀珍珠岩轻骨料混凝土 <sup>[42]</sup>	1773~1984	0.817~1.225	$k=0.0306e^{0.0018\rho}$ $R^2=0.86$

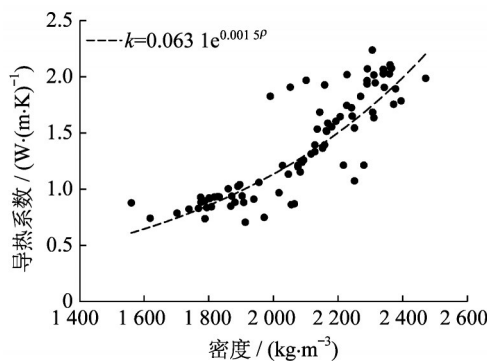


图8 再生混凝土导热系数与密度的相关性

Fig. 8 General correlation between thermal conductivity and density of recycled concrete

### 4 功能化再生混凝土

再生混凝土的导热系数低于普通混凝土,从而使再生混凝土墙体的传热系数低于普通混凝土墙体。将再生混凝土墙体应用于建筑外围护结构中有助于降低建筑制热和制冷能耗。同时,基于生命周期评价(LCA)的角度,采用再生混凝土对环境的影响远低于普通混凝土<sup>[43]</sup>。相关研究表明,生产再生骨料的能耗远低于生产天然骨料,生产再生粗、细骨料将分别减少58%和54%的非可再生能源消耗,同时分别减少65%和61%的碳排放,并且再生细骨料生产过程还会降低46%的二氧化硫的排放<sup>[44]</sup>。

基于全生命周期角度,使用再生骨料替代天然骨料可以有效地降低混凝土全生命周期的能耗和碳排放,当混凝土使用100%再生粗骨料取代时,碳排放最大可以降低约15%<sup>[45]</sup>。建筑业除了在建造阶段外,运行维护阶段也会排放大量的二氧化碳和造成大量的能量消耗。再生混凝土的热工性能优于普通混凝土,但是仅采用再生混凝土制备外围护结构并不能满足现有节能规范的要求,因此需要再生混凝土的功能化技术创新,在保证一定的力学性能的基础上,赋予再生混凝土更多的功能,如泡沫再生混凝土、储能再生混凝土、轻骨料再生混凝土等。

#### 4.1 泡沫再生混凝土

Ganesan等<sup>[46]</sup>制备密度在700~1400 kg·m<sup>-3</sup>的泡沫混凝土,其导热系数为0.24~0.74 W·(m·K)<sup>-1</sup>,远低于普通混凝土。Liu等<sup>[47]</sup>使用棕榈果壳制备了轻骨料泡沫混凝土,研究表明,轻骨料泡沫混凝土的导热系数比混凝土砖和黏土砖的导热系数分别低33%和56%。王洪镇等<sup>[48]</sup>通过物理化学混合发泡的方式制备了孔径更小的轻集料微孔混凝土,其导热系数为0.14~0.2 W·(m·K)<sup>-1</sup>。将再生混凝土结合发泡工艺制备泡沫再生混凝土可以有效地提升再生混凝土的导热系数。张景文<sup>[49]</sup>研究发现发泡剂和再生微粉掺量对再生微粉泡沫混凝土的导热系数影响较大,其中再生微粉掺量为15%时,导热系数最佳,为0.116 W·(m·K)<sup>-1</sup>。



## 4.2 储能再生混凝土

Hunger等<sup>[50]</sup>在混凝土中掺入相变材料微胶囊后,由于含气量的增加和石蜡导热系数较低,混凝土导热系数呈线性降低。Xu等<sup>[51]</sup>的研究表明,随着石蜡/膨胀蛭石骨料取代率的增加,导热系数明显降低,如当取代率为100%时,导热系数降低了64%。储能混凝土制备的方法有很多种,Shafigh等<sup>[52]</sup>详细介绍了各种将相变材料掺入混凝土中的方法。其中,通过真空吸附法将液体相变材料吸附到多孔骨料中,然后将其与其他材料混合制备储能混凝土是目前应用较为广泛的方法。再生骨料因为其表面附着着的旧砂浆,孔隙率较高,是一种吸附相变材料的良好载体。Suttaphakdee等<sup>[53]</sup>研究表明,储能再生砖混凝土具有良好的储能能力和较低的导热系数。

## 4.3 轻骨料再生混凝土

Hanif等<sup>[54]</sup>使用粉煤灰空心微珠为载体,吸附气凝胶后制备粉煤灰-气凝胶轻质骨料。研究表明,掺入5%的粉煤灰-气凝胶轻质骨料后,混凝土的导热系数下降了23.3%。Wang等<sup>[55]</sup>按体积比1:1将玻化微珠掺入再生混凝土中,得到再生保温混凝土,导热系数最低可以达到 $0.322 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,远低于普通混凝土,并且其力学性能和耐久性能表现良好。Pavlu等<sup>[56]</sup>将聚苯颗粒EPS掺入再生混凝土发现,掺入30%的EPS,再生混凝土的导热系数降低了68.5%。Guo等<sup>[57]</sup>研究表明,随着玻化微珠掺量的增加,再生保温混凝土的热阻明显增加。

## 5 结语

本文总结了再生混凝土导热性能的国内外研究现状,系统回顾了混凝土导热系数理论,剖析了影响再生混凝土导热系数的关键因素,分析拟合了再生混凝土导热系数经验公式,并对现有功能性再生混凝土进行了评述。

再生骨料的物理性质对再生混凝土的导热系数有一定的影响,主要表现为骨料吸水率较高,密度较低时(即孔隙率较高时),混凝土导热系数较低。再生骨料取代率对再生混凝土导热系数有着显著的影响,且细骨料较粗骨料影响更大,再生粗骨料全取代时,混凝土导热系数降低量可达29%,再生细骨料全取代时,混凝土导热系数降低量可达48%。同时,采用再生微粉取代部分水泥时,可以有效降低混凝土的导热系数。环境温度对再生混凝土导热系数有显著的影响,随着温度的升高,其导热系数明显降低,

并且随着再生骨料取代率的增加,其导热系数降低量增加。

基于再生混凝土导热系数相关实验数据,通过拟合分析,提出了再生混凝土导热系数与密度的经验回归关系式(公式10),可以用于密度范围为 $1500 \sim 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的再生混凝土导热系数预测。

再生骨料附着砂浆含量、再生细骨料孔隙率、不同种类再生粉体以及不同粒径再生粉体等对再生混凝土导热系数的影响还需要进一步研究,为建立适宜于再生混凝土的导热系数理论奠定试验基础。

将不同类型的再生混凝土应用于不同的建筑结构中,是一种提高废弃混凝土资源化利用率的有效途径;将传统再生混凝土与功能化再生混凝土相组合,以实现再生混凝土结构功能一体化设计,是未来的一个研究方向。

### 作者贡献声明:

肖建庄:论文的选题、指导、修改。

郝璐岑:具体工作的开展和论文撰写。

曹万智:论文的指导、修改。

许碧菀:论文的修改。

### 参考文献:

- [1] ASADI I, SHAFIGH P, Hassan Z, *et al.* Thermal conductivity of concrete - a review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 20: 81.
- [2] SINGH R, SHUKLA S, GUPTA N. Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: a critical review [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101884.
- [3] REAL S, GOMES M, MORET A, *et al.* Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 460.
- [4] YUE G, MA Z, LIU M, *et al.* Damage behavior of the multiple ITZs in recycled aggregate concrete subjected to aggressive ion environment [J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 245: 118419.
- [5] LU W. Big data analytics to identify illegal construction waste dumping: a Hong Kong study [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019.
- [6] THOMAS C, DE J, CIMENTADA A, *et al.* Macro- and micro- properties of multi-recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118843.
- [7] WANG R, YU N, LI Y. Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118164.
- [8] SARGAM Y, WANG K, ALLEMAN J. Effects of modern

- concrete materials on thermal conductivity [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(4): 4020058.
- [9] TANG Q, MA Z, WU H, *et al.* The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: a critical review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103807.
- [10] GUO H, SHI C, GUAN X, *et al.* Durability of recycled aggregate concrete - a review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 89: 251.
- [11] TAM V, SOOMRO M, EVANGELISTA A. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000—2017) [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 272.
- [12] WANG J, CARSON J, NORTH M, *et al.* A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2006, 49(17/18): 3075.
- [13] GONZO E. Estimating correlations for the effective thermal conductivity of granular materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 90(3): 299.
- [14] HARMATHY T Z. Thermal properties of concrete at temperature [J]. *Journal of Material*, 1970, 5: 47.
- [15] CAMPBELL-ALLEN D, THORNE C. The thermal conductivity of concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1963, 15(43): 39.
- [16] KHAN M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models [J]. *Building & Environment*, 2002, 37(6): 607.
- [17] GONG L, WANG Y, CHENG X, *et al.* A novel effective medium theory for modelling the thermal conductivity of porous materials [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 68: 295.
- [18] 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.  
WANG Licheng, CHANG Ze, BAO Jiwen. Prediction model for the thermal conductivity of concrete based on its composite structure [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(7): 765
- [19] CHU Z, ZHOU G, WANG Y, *et al.* Thermal - physical properties of selected geomaterials: coal, sandstone and concrete based on basic series and parallel models [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(5): 181.
- [20] 陈春,钱春香,许燕波. 基于最小热阻理论的混凝土导热系数计算模型 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(2): 383.  
CHEN Chun, QIAN Chunxiang, XU Yanbo. Calculation model of thermal conductivity of concrete based on minimum thermal resistance theory [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2012, 42(2): 383.
- [21] ZHU L, DAI J, BAI G, *et al.* Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 94: 620.
- [22] NGOHPOK C, SATA V, SATIENNAM T, *et al.* Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2018, 22: 1369.
- [23] 肖建庄,黄运标,任红梅. 混凝土热工参数影响因素及理论计算 [J]. *粉煤灰*, 2008, 20(5): 17.  
XIAO Jianzhuang, HUANG Yunbiao, REN Hongmei. Influence factors of thermal properties of concrete and theoretical analysis [J]. *Coal Ash*, 2008, 20(5): 17.
- [24] ZHAO H, LIU F, YANG H. Thermal properties of coarse RCA concrete at elevated temperatures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 140: 180.
- [25] SARGAM Y, WANG K, ALLEMAN J. Effects of modern concrete materials on thermal conductivity [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(4): 4020051.
- [26] OMRANE M, RABEHI M. Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete - science direct [J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 247: 1.
- [27] MARÍA F, JOSÉ M, ITZIAR G, *et al.* Experimental study on thermal conductivity of self-compacting concrete with recycled aggregate [J]. *Materials*, 2015, 8(7): 4457.
- [28] PECUR I, STIRMER N, MILOVANOVIC B. Recycled aggregate concrete for nearly zero energy buildings [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2014, 67(11/12): 575.
- [29] CANTERO B, BRAVO M, BRITO J, *et al.* Thermal performance of concrete with recycled concrete powder as partial cement replacement and recycled CDW aggregate [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4540.
- [30] MIGUEL B, JORGE B, LUÍS E. Thermal performance of concrete with recycled aggregates from cdw plants [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 740.
- [31] LANEYRIE C, BEAUCOUR A, GREEN M, *et al.* Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 111(15): 36.
- [32] KAZMI S, MUNIR M, WU Y, *et al.* Investigation of thermal performance of concrete incorporating different types of recycled coarse aggregates [J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 270: 121433.
- [33] 肖建庄,宋志文,张枫. 混凝土导热系数试验与分析 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(1): 17.  
XIAO Jianzhuang, SONG Zhiwen, ZHANG Feng. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1): 17.
- [34] 游帆,郑建岚. 全再生骨料混凝土导热性能试验研究 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 391.  
YOU Fan, ZHENG Jianlan. Experimental study of thermal conductivity of recycled concrete [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 2018, 46(3): 391.
- [35] 潘凯楠. 再生细骨料混凝土高温下材料力学及其热工性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

- PAN Kainan. Research on mechanical and thermal properties of fine recycled aggregate concrete at elevated temperatures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [36] DEMIRBO A R, GÜL R. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35 (11): 1155.
- [37] KHALIQ W, KODUR V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1112.
- [38] COLLET F, PRETOT S. Thermal conductivity of hemp concretes: variation with formulation, density and water content [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 65(13): 612.
- [39] ALENGARAM U, MUHIT B, JUMAAT M, *et al.* A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials [J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 522.
- [40] DEMIRBOGA R, KAN A. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 35: 730.
- [41] GAO T, JELLE B, GUSTAVSEN A, *et al.* Aerogel-incorporated concrete: an experimental study [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 52: 130.
- [42] GÜI R, OKUYUCU E, TÜRKMEN I, *et al.* Thermo-mechanical properties of fiber reinforced raw perlite concrete [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(29): 5145.
- [43] PEŠTA J, PAVLŮ T, FORŤOVÁ K, *et al.* Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study [J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1581.
- [44] HOSSAIN M, POON C, LO I, *et al.* Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 109: 67.
- [45] XIA B, DING T, XIAO J. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: a novel framework and case study [J]. *Waste Management*, 2020, 105: 268.
- [46] GANESAN S, OTHUMAN M, MOHD Y, *et al.* Thermal properties of foamed concrete with various densities and additives at ambient temperature [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 747: 230.
- [47] LIU M, ALENGARAM U, JUMAAT M, *et al.* Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete [J]. *Energy & Buildings*, 2013, 72(2014): 238.
- [48] 王洪镇, 杨俊晓. 流态轻集料微孔混凝土的试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2011(2): 123.
- WANG Hongzheng, YANG Junxiao. Experimental research of fluid lightweight aggregate micro foam concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2011(2): 123.
- [49] 张景文. 再生微粉泡沫混凝土的制备与性能研究 [D]. 西宁: 青海大学, 2020.
- ZHANG Jingwen. Preparation and properties of recycled micropowder foam concrete [D]. Xinin: Qinghai University, 2020.
- [50] HUNGER M, ENTROP A, MANDILARAS I, *et al.* The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31(10): 731.
- [51] XU B, MA H, LU Z, *et al.* Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites [J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 358.
- [52] SHAFIGH P, ASADI I, MAHYUDDIN N. Concrete as a thermal mass material for building applications - a review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 19: 14.
- [53] SUTTAPHAKDEE P, DULSANG N, LORWANISHPAISARN N, *et al.* Optimizing mix proportion and properties of lightweight concrete incorporated phase change material paraffin/recycled concrete block composite [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 127: 475.
- [54] HANIF A, DIAO S, LU Z, *et al.* Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres - mechanical and thermal insulating properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 116: 422.
- [55] WANG W, LIN Z, LIU Y, *et al.* Mechanical properties and stress - strain relationship in axial compression for concrete with added glazed hollow beads and construction waste [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 71: 425.
- [56] PAVLU T, FORTOVA K, DIVIS J, *et al.* The utilization of recycled masonry aggregate and recycled EPS for concrete blocks for mortarless masonry [J]. *Materials*, 2019, 12(12): 1923.
- [57] GUO Y, LIU Y, WANG W, *et al.* A study on heat transfer performance of recycled aggregate thermal insulation concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101797.