

耐候性试验下泡沫混凝土孔结构与热工性能演变规律

丁 杨¹, 董晶亮², 王中平³, 黄神恩³

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

(2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

(3. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘 要: 为明确泡沫混凝土现浇屋面保温系统耐候性能的影响因素, 对泡沫混凝土分别展开了湿热循环、干湿循环、高低温循环、冻融循环和多场耦合循环5种耐候性试验, 通过分析泡沫混凝土孔结构、体积吸水率和导热系数变化率的演变规律揭示其耐候性能。试验结果表明: 经过112次湿热循环试验后, 泡沫混凝土的体积吸水率仅增长了1.77%, 导热系数降低了6%; 经过112次干湿循环试验, 泡沫混凝土的体积吸水率由20.64%增长到25.63%, 导热系数由0.0724增长到0.0836 W/(m·K), 涨幅15.47%; 经过112次高低温循环试验, 泡沫混凝土的体积吸水率由21.13%增长到25.14%, 导热系数增大了6.68%; 经过112次冻融循环试验, 泡沫混凝土体积吸水率由23.97%增长到29.38%, 导热系数由0.0789上升至0.0980 W/(m·K), 增长了24.21%; 而经过112次多场耦合试验, 泡沫混凝土的体积吸水率由14.12%增长到16.88%, 导热系数从0.0720增长到0.0850 W/(m·K), 增幅18.06%。经过干湿循环、高低温循环、冻融循环和多场耦合循环4种耐候性试验后, 泡沫混凝土中的泡孔破裂倒塌严重, 板材开裂溃散, 导致其保温隔热性能下降、体积吸水率升高。而泡沫混凝土具有很好的耐湿热老化性能, 经过湿热循环试验后, 其孔结构、体积吸水率和导热系数均没有发生显著变化。

关键词: 泡沫混凝土; 耐候性试验; 孔结构; 热工性能

中图分类号: TQ02; TU528.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2019)12-1199-06

Evolution Rule of Pore Structure and Thermal Performance of Foam Concrete under Accelerated Weathering Tests

DING Yang¹, DONG Jingliang², WANG Zhongping³, HUANG Shen'en³

(1. School of Architecture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to understand the affect factors of weathering resistance of foam concrete cast-in-place roof insulation system, five accelerated weathering tests of foam concrete were carried out, including humid-heat cycle, dry-wet cycle, high-low temperature cycle, freeze-thaw cycle and multi-field coupling cycle. By analyzing the evolution rule of its pore structure, volume water absorption and thermal conductivity, the weathering resistance of foam concrete was revealed. The results show that the volume water absorption of foam concrete increases only 1.77% and its thermal conductivity decreases by 6% after 112 humid-heat cycles. After 112 dry-wet cycles, the volume water absorption of foam concrete increases from 20.64% to 25.63%, and its thermal conductivity increases from 0.0724 to 0.0836 W/(m·K), which has increased by 15.47%. After 112 high-low temperature cycles, the volume water absorption of foam concrete increases from 21.13% to

25.14%, and its thermal conductivity has increased by 6.68%. After 112 freeze-thaw cycles, the volume water absorption of foam concrete increases from 23.97% to 29.38%. Meanwhile, its thermal conductivity increases from 0.0789 to 0.0980 W/(m·K), which has increased by 24.21%. After 112 multi-field coupling cycles, the volume water absorption of foam concrete increases from 14.12% to 16.88%. Its thermal conductivity has increased by 18.06%, which increases from 0.0720 to 0.0850 W/(m·K). Through four kinds of accelerated weathering tests, which are dry-wet cycle, high-low temperature cycle, freeze-thaw cycle and multi-field coupling cycle, the pore structures in foam concrete has broken and collapsed seriously. Furthermore, the foam

收稿日期: 2018-09-06 修回日期: 2018-12-24

基金项目: “十三五”国家重点研发项目(2016YFC0700807); 国家自然科学基金项目(51708220); 校科研启动基金项目(10012003417017); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金资助项目(201806)

第一作者: 丁 杨, 男, 1992年生, 博士研究生

Email: ceyangding@zju.edu.cn

通讯作者: 董晶亮, 男, 1988年生, 讲师, 硕士生导师,

Email: 13677089341@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201809006

concrete sheet has cracked and collapsed. Therefore, the thermal insulation performance of foam concrete decreases and its volume water absorption increases. The foam concrete shows good performance in humid-heat cycle test. During this process, the pore structure, volume water absorption and thermal conductivity of foam concrete have no significant variation.

Key words: foam concrete; accelerated weathering test; pore structure; thermal performance

1 前言

屋面作为建筑围护结构之一,屋面保温系统的耐候性能直接关系到其使用寿命,并对降低建筑能耗具有深远意义^[1]。泡沫混凝土现浇屋面系统是目前使用最广泛的屋面保温系统之一,但仍需对其耐候性能提升技术做进一步研究。樊均等针对环境因素对泡沫混凝土夹心保温板的热工耐久性进行了研究^[2]。向仁科等以脱硫石膏为基材,添加矿渣、水泥等制备了不同密度等级的石膏泡沫混凝土,试验结果表明该泡沫混凝土具备更低的导热系数^[3]。崔玉理等研究了水和养护环境温度对泡沫混凝土导热系数的影响,当水温为 35~40 ℃时,泡沫混凝土内部孔径分布均匀、连通孔少,导热系数较小^[4]。袁克阔通过正交试验得到了自制泡沫混凝土的最佳配合比(其中以水泥为基本量,粉煤灰、珍珠岩、泡沫、防冻剂、减水剂和促凝剂的添加量与水泥质量之比分别为 18%, 150%, 2%, 1%, 30%, 4%;聚丙烯纤维、水、防水剂的添加量与混凝土拌合物总质量之比分别为 0.2%, 40%, 0.3%),研制出了一种高强、防寒、保温的泡沫混凝土^[5]。于水军等通过研究钢渣粉煤灰泡沫混凝土的热工性质,发现密度可以作为衡量泡沫混凝土隔热性及耐火性的指标^[6]。刘润清等得出将中小孔与大孔的比例控制在 10 倍范围内,有助于使泡沫混凝土获得最优的耐干湿循环能力^[7]。庞超明等发现离子的存在不影响混凝土中水分的传输方式,但会大大降低其毛细吸附和扩散传输效果^[8]。除了通过试验分析泡沫混凝土材料在不同环境下的耐候性,还可以采用数值模拟的方法对其进行研究。陈德鹏等给出了一种计算混凝土湿热耦合变形的解析方法,并将实际工程结构用混凝土变形的数值计算结果与实测值进行对比,结果表明了该计算方法的合理性和有效性^[9]。本团队通过 COMSOL 仿真对屋面保温隔热层进行构造模拟,得出材料组合、保温层形状、拼接方式和界面处材料对隔热层传热性能的影响^[10]。上述研究成果通过模拟仿真方法对泡沫混凝土的保温性能和耐久性能进行分析,但这一数值分析需要大量试验予以验证。

本文以泡沫混凝土为对象,研究材料在湿热循环、干湿循环、高低温循环、冻融循环和多场耦合循环 5 种耐候性试验下的孔结构、体积吸水率和导热系数变化率的演变规律,为今后泡沫混凝土现浇屋面保温系统耐候性能设计提供理论依据。

2 实验

2.1 实验材料

本文采用上海蜀通建材有限公司生产的尺寸为 300 mm×300 mm×25 mm 的泡沫混凝土(FC),如图 1 所示。其导热系数为实验室测定数据,密度和比热容为厂家提供数据,具体参见表 1。

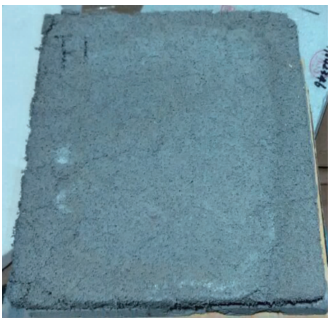


图 1 泡沫混凝土

Fig. 1 Foam concrete

表 1 泡沫混凝土性能参数

Table 1 Performance parameters of foam concrete

Material	Density /(kg/m ³)	Thermal conductivity /(W/(m·K))	Specific heat capacity /(J/(kg·K))
FC	500	0.19	1050

2.2 实验方法

湿热环境参照 GB/T 12000-2003《塑料暴露于湿热、水喷雾和盐雾中影响的测定》进行构建:设置 GDJS-010L 型恒温恒湿箱内温度为 60 ℃,湿度为 93% RH (relative humidity, 相对湿度),将试样置于此环境下循环 112 次,具体循环过程如图 2 所示。

干湿循环试验按照 GB/T 11969-2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》中关于干湿循环试验规定进行:将试样置于 60 ℃下干燥 7 h,随后空冷 20 min,再放入(20±5) ℃的水中浸泡 5 min 为一个干湿循环,如此循环 112 次。

高低温循环试验按照 GB/T 2423.34-2012《环境试验第 2 部分:试验方法试验 ZAD:温度湿度组合》进行:将试样于 60 ℃高温下暴露 3 h(其中升温 1 h),随后直接在 -20 ℃低温下暴露 3 h(其中降温 1 h),此为一个循环,如此循环 112 次。

冻融循环试验参照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长

期性能和耐久性能试验方法标准》进行:调节冰柜温度在 $-18\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证试样的冷冻时间为4 h;冷冻结束后,立即将试样转入温度为 $18\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水箱中,保持1 h,如此循环112次。

多场耦合循环参照行业标准 JGJ 144-2004《外墙外保温工程技术规程》附录 A 中关于保温隔热材料耐候性试验方法进行:控制试样表面温度、湿度变化如图2所示,24 h内完成一次循环。试验过程中,为保证压力值恒定,在泡沫混凝土上叠放重物使其重力加载维持在 2 kN/m^2 。

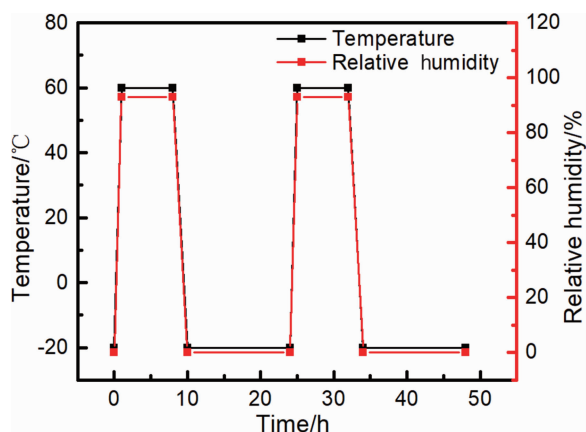


图2 多场温湿循环示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-field temperature and humidity circulation

对于5种试验的试样,分别在循环7,14,28,56,84,112次后测量其质量和导热系数,并按照以下方法计算其体积吸水率和导热系数变化率。泡沫混凝土的体积吸水率:首先将试样在101-3GW型干燥箱中于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下干燥24 h,得到其绝干状态下的质量为 m ;然后使绝干状态下的泡沫混凝土充分吸水24 h达到饱和,测得其吸水饱和后的质量为 m_1 ;通过泡沫混凝土绝干状态下的质量和密度(表1)求出其绝干状态下的体积 V_0 ,最后根据公式(1)求出泡沫混凝土的体积吸水率 W_v 。

$$W_v = \frac{m_1 - m}{V_0} \cdot \frac{1}{\rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度,常温下取 1 g/cm^3 。

泡沫混凝土的导热系数直接采用FD-TC-II型导热系数测定仪进行测定。根据公式(2)将材料在耐候性试验期间的导热系数转换为导热系数变化率:

$$ROC = \frac{\lambda_\tau - \lambda_0}{\lambda_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ROC 为导热系数变化率; λ_τ 和 λ_0 分别为材料不同时间段的导热系数值和初始导热系数值,单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

经过耐候性试验后,泡沫混凝土的孔结构变化通过数码相机拍摄的照片来表征,并进行对比分析。

3 结果与讨论

3.1 宏观性能分析

泡沫混凝土经过5种耐候性试验后,各试样内部孔隙的变化可用体积吸水率加以表征。体积吸水率值的大小取决于材料内部的孔隙构造。若材料具有微细且连通的孔隙,则吸水率就较大;若为封闭孔隙,则水分难以渗入,吸水率就较小;若是较粗的大开口孔隙,水分容易进入,但不易在孔内保留,仅起到润湿孔壁的作用,吸水率也较小。

3.1.1 体积吸水率

从图3中可直观地看出泡沫混凝土经过不同耐候性试验后体积吸水率的变化。

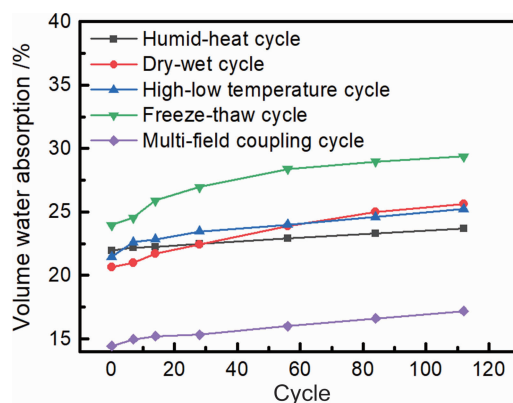


图3 泡沫混凝土在不同耐候性试验中的体积吸水率

Fig. 3 Volume water absorption of foam concrete under different accelerated weathering tests

湿热循环试验中,泡沫混凝土存在凝胶间孔、颗粒间孔和宏孔,孔径分布范围为 $0.05\sim 500\text{ }\mu\text{m}$,除去无法保留水分的宏孔,其体积吸水率仍在20%以上。湿热老化试验过程中,随着试验时间的延长,泡沫混凝土的体积吸水率变化不大,当循环112次时测量的体积吸水率相较于初始时仅有1.77%的增长。此过程中,泡沫混凝土的表面泡孔除不可避免的机械损伤外,大部分泡孔形状完整、排列规则。

从图3的干湿循环曲线得知,泡沫混凝土体积吸水率由初始值20.64%增长到25.63%,增长速率很大。随着干湿循环试验的进行,泡沫混凝土的泡孔结构逐渐受到破坏,循环112次后泡孔破裂明显,局部出现空洞。泡孔的破裂倒塌不仅造成泡沫混凝土质量的损失,而且导致其中封闭孔数量的减少,孔之间连通性提高。因此,随着干湿循环的进行,泡沫混凝土的体积吸水率逐渐提高。

由冻融循环试验结果可知,泡沫混凝土在冻融循环前期和中期出现快速增长,冻融循环56次后试样体积吸水率增长变缓,循环112次后其体积吸水率从23.97%提高到了29.38%。这是因为试验前期,泡孔因冻融被破

坏;随冻融循环次数的增加,受到破坏的封闭孔数量增多,体积吸水率快速增长;而在试验后期,虽然体积吸水率仍在增长,但增速减缓,这是由于随着冻融循环试验的进行,中小孔因孔壁破坏而贯穿,逐渐形成大孔、宏孔甚至裂纹,水分无法保留在孔内部,仅起到润湿的作用,故而在试验后期泡沫混凝土的体积吸水率的增长速率减缓。

高低温循环试验中泡沫混凝土体积吸水率缓慢增加,经 112 次循环后,其体积吸水率从 21.13% 增加到了 25.14%。原因与湿热老化、干湿循环和冻融循环类似:在温度应力下,泡孔开裂导致体积吸水率增加。在多场耦合试验中,泡沫混凝土的体积吸水率呈缓慢增长趋势,经 112 次循环后,其体积吸水率从 14.12% 增长到 16.88%,增幅 2.76%。

3.1.2 导热系数变化率

泡沫混凝土在不同耐候性试验中的导热系数变化率如图 4 所示。泡沫混凝土的泡孔结构主要是由水泥砂浆硬化形成的孔壁及空气填充的孔隙组成。根据 Campbell-Allen 模型^[11]:泡沫混凝土的导热系数与其固相占比相关,固相占比越高则其导热系数值越大。

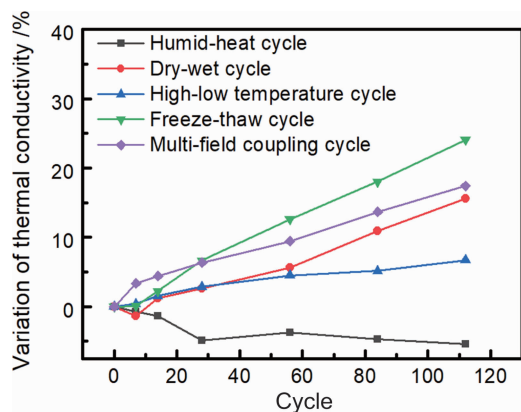


图 4 泡沫混凝土在不同耐候性试验中的导热系数变化率

Fig. 4 Variation of thermal conductivity of foam concrete under different accelerated weathering tests

湿热环境下,泡沫混凝土的固相占比降低,气相占比提高,而干燥空气的导热系数较水泥砂浆的更低。因此,

湿热循环环境下,在泡沫混凝土的泡孔结构完整性没有受损的前提下,因泡沫混凝土质量损失,其导热系数呈逐渐降低的趋势,在循环结束后,仅降低了 6%。

在干湿循环试验中,泡沫混凝土的导热系数从初始值 0.0724 增长到 0.0836 W/(m·K),涨幅为 15.47%。这是因为泡沫混凝土的泡孔结构受到破坏,局部出现空洞,从而缩短了热流在其中的传输路径,导致其导热系数有所提高。经过 112 次高低温循环后,泡沫混凝土的导热系数增长率为 6.68%。此过程中,泡沫混凝土因高低温循环形成了裂纹,裂纹贯穿多个泡孔。随着裂纹的增多,孔与孔之间的有效连通性也随之增加,因此,使得热流在泡沫混凝土内部的传输路径缩短,热阻值降低,导热系数增加,进而影响了泡沫混凝土的保温隔热性能。

从冻融循环过程中试样的导热系数变化率随循环次数的变化曲线可知,冻融循环 112 次后泡沫混凝土的导热系数上升明显,由初始值 0.0789 上升至 0.0980 W/(m·K),增长了 24.21%。这是因为冻融循环严重破坏了泡沫混凝土的结构,经 112 次冻融循环后,泡沫混凝土溃散严重,表面出现大量纵横交错的裂纹,并且成为热流聚集处,极大地缩短了热流在泡沫混凝土内部的传热路径,降低了材料的热阻值,提高了其导热系数。

经过多场耦合试验,泡沫混凝土导热系数从 0.0720 增长到 0.0850 W/(m·K),增幅 18.06%。这是因为微细的裂纹遍布泡沫混凝土,裂纹宽度约为 100 μm,长度在 1 cm 左右,贯穿 2~4 个泡孔。这些裂纹在传热过程中成为热流集中通过的通道,降低了泡沫混凝土的有效热阻。多场耦合中高低温交变使泡沫混凝土泡孔内的冷凝水饱和,泡孔壁因冻融开裂,且其上方施加的恒定压力加速了微裂纹的扩展。随着多场耦合循环周期的增加,裂纹数目不断增加,因此材料的导热系数也逐渐提高。

3.2 微观分析

3.2.1 干湿循环

图 5 是干湿循环不同次数后泡沫混凝土内部孔结构的数码照片,可以明显看到泡孔的破裂。结合图 3 和图 4 可知,泡沫混凝土经过干湿循环后,其体积吸水率和导热

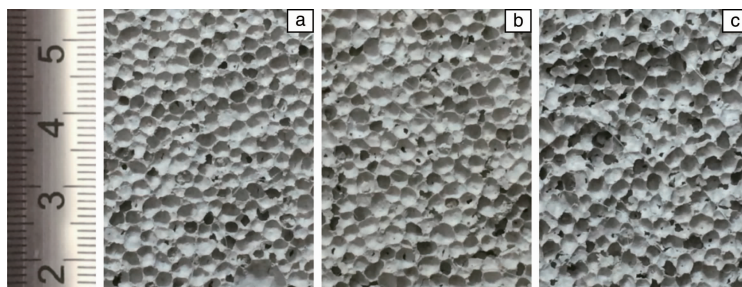


图 5 干湿循环不同次数后泡沫混凝土的数码照片: (a) 初始试样, (b) 干湿循环 28 次, (c) 干湿循环 112 次

Fig. 5 Digital photos of foam concrete with different dry-wet cycles: (a) original sample, (b) 28 dry-wet cycles, (c) 112 dry-wet cycles

系数显著增加。这是因为泡孔的破坏，增加了孔与孔之间的连通性，增大了泡沫混凝土的孔隙率，同时缩短了热流的传热路径，降低了材料的热阻，从而使材料的保温隔热性能降低。

3.2.2 高低温循环

图 6 为泡沫混凝土经过不同次高低温循环试验后的表面宏观形貌图。经过 112 次高低温循环试验后，泡沫混凝土的泡孔发生破坏、倒塌并出现裂缝，开孔率进一

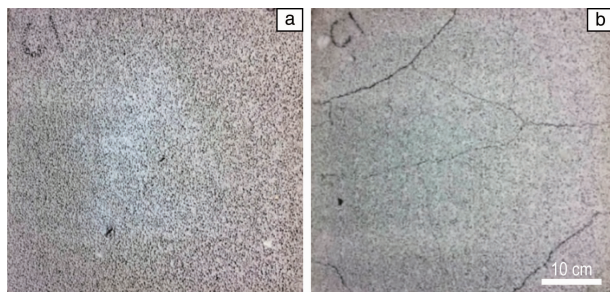


图 6 高低温循环不同次数后泡沫混凝土的表面形貌：(a)初始试样，(b)高低温循环 112 次

Fig. 6 The surface morphologies of foam concrete after different high-low temperature cycles: (a) original sample, (b) 112 high-low temperature cycles

步提高，孔与孔之间的连通性也有所提高，从而导致材料的体积吸水率和导热系数显著提高。

3.2.3 冻融循环

未经冻融循环及分别经历 28 次和 112 次冻融循环后的泡沫混凝土的数码照片如图 7 所示。经 112 次冻融循环后，泡沫混凝土表面分布着大大小小的网络状裂纹，泡孔破裂倒塌严重。试验过程中，试样被搬动、浸水时，构成泡沫混凝土孔壁的水泥砂浆颗粒因泡沫混凝土开裂脱离本体。这是导致泡沫混凝土经冻融试验后体积吸水率和导热系数提高的根本原因。

3.2.4 多场耦合

多场耦合试验中设定相对湿度值为 93%，温度为 60℃，以保证恒温恒湿箱内有较多的水汽。降温时，水汽在泡沫混凝土孔内凝结液化，虽无法使大孔饱水，但其中小孔径的泡孔可能因此充水饱和。随后在 -20℃ 的低温环境中，泡孔内的水结冰膨胀，使泡孔壁开裂破坏。此外，在泡沫混凝土上方施加的压应力可能加剧冻融对泡沫混凝土的破坏，其经过不同时期多场耦合作用后的形貌如图 8 所示。因此，孔结构的破坏和孔隙率的提高是导致泡沫混凝土体积吸水率和导热系数显著提高的根本原因。

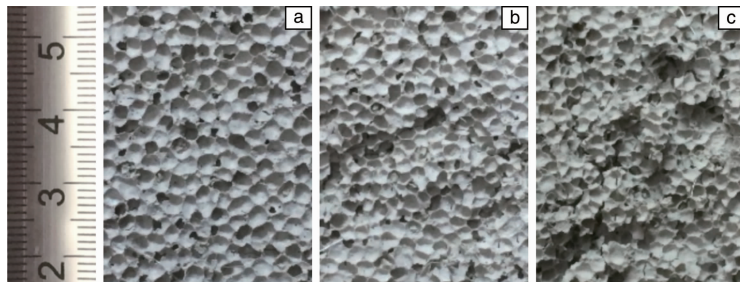


图 7 冻融循环不同次数后泡沫混凝土的数码照片：(a)初始试样，(b)冻融循环 28 次，(c)冻融循环 112 次

Fig. 7 Digital photos of foam concrete with different freeze-thaw cycles: (a) original sample, (b) 28 freeze-thaw cycles, (c) 112 freeze-thaw cycles

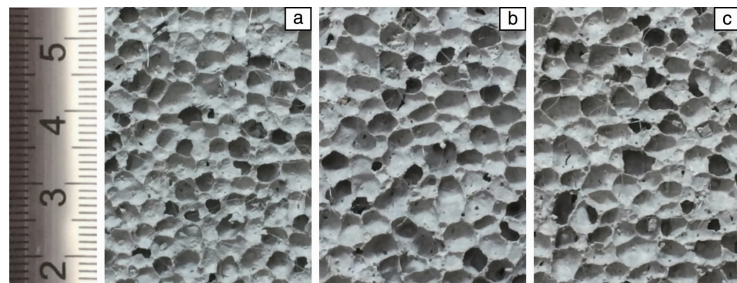


图 8 多场耦合作用下不同时期泡沫混凝土的数码照片：(a)初始试样，(b)经 28 次多场耦合作用，(c)经 112 次多场耦合作用

Fig. 8 Digital photos of foam concrete in different stages of multi-field coupling cycles: (a) original sample, (b) after 28 multi-field coupling cycles, (c) after 112 multi-field coupling cycles

4 结 论

本文对泡沫混凝土在湿热循环、干湿循环、高低温

循环、冻融循环和多场耦合循环等环境中的耐候性能展开了详细的研究，得到了如下结论：

(1) 泡沫混凝土具有优良的抗湿热老化性能。经过

112 次湿热循环试验后, 其体积吸水率仅增长了 1.77%, 导热系数仅降低了 6%。

(2) 干湿循环环境对泡沫混凝土材料的导热性能影响较大。经过 112 次的干湿循环试验, 其体积吸水率由 20.64% 增长到 25.63%, 导热系数由 0.0724 增长到 0.0836 W/(m·K), 涨幅 15.47%。

(3) 高低温循环环境对泡沫混凝土的导热性能影响不显著。经过 112 次高低温循环试验, 其体积吸水率由 21.13% 增长到 25.14%, 导热系数增大了 6.68%。

(4) 冻融循环严重破坏了泡沫混凝土的结构, 极大地缩短了热流在其内部的传热路径, 降低了材料的热阻值。经过 112 次冻融循环后, 泡沫混凝土体积吸水率由 23.97% 增长到 29.38%, 导热系数由 0.0789 上升至 0.0980 W/(m·K), 增长了 24.21%。

(5) 经过 112 次多场耦合试验, 泡沫混凝土的体积吸水率由 14.12% 增长到 16.88%, 导热系数从 0.0720 增长到 0.0850 W/(m·K), 增幅 18.06%。多场耦合作用下的泡沫混凝土受到冻融、高低温和干湿循环的联合作用: 小孔径泡孔内冷凝水饱和, 泡孔壁因冻融开裂, 恒定压应力加速了微裂纹的扩展。随着作用时间增加, 长度为 2~4 cm 的裂纹数目增多, 导热系数逐渐提高。

参考文献 References

- [1] 丁杨, 周双喜, 王中平, 等. 化工新型材料[J], 2017, 45(10): 17-19.
DING Y, ZHOU S X, WANG Z P, *et al.* New Chemical Materials [J], 2017, 45(10): 17-19.
- [2] 樊均, 管文. 混凝土与水泥制品[J], 2014(6): 58-61.
FAN J, GUAN W. Concrete and Cement Products[J], 2014(6): 58-61.
- [3] 向仁科, 石宗利, 谢建海. 新型建筑材料[J], 2011(9): 8-10.
XIANG R K, SHI Z L, XIE J H. New Building Materials[J], 2011 (9): 8-10.
- [4] 崔玉理, 贺鸿珠. 建筑材料学报[J], 2015, 18(5): 836-839.
CUI Y L, HE H Z. Journal of Building Materials[J], 2015, 18(5): 836-839.
- [5] 袁克阔. 冰川冻土[J], 2016, 38(2): 438-444.
YUAN K K. Journal of Glaciology and Geocryology[J], 2016, 38(2): 438-444.
- [6] 于水军, 李彬, 陈晓利. 河南城建学院学报[J], 2015(1): 5-9.
YU S J, LI B, CHEN X L. Journal of Henan Urban Construction College[J], 2015(1): 5-9.
- [7] 刘润清, 欧阳鹏, 黄紫妍, 等. 混凝土[J], 2014(11): 38-43.
LIU R Q, OUYANG P, HUANG Z Y, *et al.* Concrete[J], 2014(11): 38-43.
- [8] 庞超明, 徐剑, 王进, 等. 建筑材料学报[J], 2013, 16(2): 315-320.
PANG C M, XU J, WANG J, *et al.* Journal of Building Materials[J], 2013, 16(2): 315-320.
- [9] 陈德鹏, 钱春香, 缪昌文, 等. 东南大学学报(自然科学版)[J], 2010, 40(S2): 89-95.
CHEN D P, QIAN C X, MIAO C W, *et al.* Journal of Southeast University (Natural Science Edition)[J], 2010, 40(S2): 89-95.
- [10] 丁杨, 周双喜, 王中平, 等. 塑料工业[J], 2017, 45(11): 150-152.
DING Y, ZHOU S X, WANG Z P, *et al.* Plastics Industry[J], 2017, 45(11): 150-152.
- [11] CAMPBELL-ALLEN D, THORNE C P. Magazine of Concrete Research [J], 1963, 15(43): 39-48.

(编辑 王 瑶)